

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ISSN 2073-7173 (print)

ISSN 2588-0233 (on line)

22 десятилетие
науки
и технологий 31



НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕКА
LIBRARY.RU



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



THOMSON REUTERS
WEB OF KNOWLEDGE



ULRICH'S
KNOWLEDGEBASE

№ 3 Часть 3 2023
№ 3 Part 3 2023

Morskie intelektual 'nye tehnologii

Труды VI Всероссийской научно-практической
конференции с международным участием

ПОЛЯРНАЯ МЕХАНИКА

01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
1100101111000100110000110110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
0101000110111010010001001110110000101100111010100111010011000101010101010010011001110
11010110000101011101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001
10011010011011111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 101
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 101





ISSN № 2588-0233 (print)
ISSN № 2073-7173 (on line)

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 3 часть 3 2023 Сквозной номер 61

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.

Год основания – 2008. Периодичность издания - 4 номера в год. 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 (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 14400 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

Проектирование и конструкция судов;

Теория корабля и строительная механика;

Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства;

Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные);

Информационно-измерительные и управляющие системы;

Системный анализ, управление и обработка информации;

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;

Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования;

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.

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова

© ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ», 2023



ISSN № 2588-0233 (print)
ISSN № 2073-7173 (on line)

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 3 part 3 2023 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 (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 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: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova

© RESEARCH CENTRE «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES» Ltd, 2023



ISSN № 2588-0233 (print)
ISSN № 2073-7173 (on line)

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

www.morintex.ru

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор:

Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора

А.И. Гайкович, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Д.А. Скороходов, д.т.н., профессор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург

А.И. Фрумен, к.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

П.А. Шауб, д.т.н., профессор, Центр технологии судостроения и судоремонта, Санкт-Петербург

С.Н. Рюмин, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Члены Редколлегии

В.Г. Бугаев, д.т.н., профессор, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

Е. П. Бураковский, д.т.н., профессор, филиал

Военно-морской академии, Калининград

Ю.А. Власов, к.ф.-м.н., преподаватель, Флоридский Международный Университет, Майами, США

М.В. Войлошников, д.т.н., профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток

В.А. Евтеев, д.т.н., Объединенная судостроительная корпорация, Санкт-Петербург

И.И. Костылев, д.т.н., профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адм. С.О. Макарова, Санкт-Петербург

В.В. Родионов, к.т.н., Си Проект, Санкт-Петербург

В.Ю. Семенова, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский морской государственный университет, Санкт-Петербург

Н.А. Тарануха, д.т.н., профессор, Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Комсомольск-на-Амуре

Ю.С. Федосенко, д.т.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород

Редакционный Совет

Сопредседатели

Г.А. Туричин, д.т.н., Ректор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

Члены Совета

Е.М. Апполонов, д.т.н. генеральный директор, "ЦКБ "Лазурит", Нижний Новгород

И.Г. Малыгин, д.т.н., профессор, директор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург

Г.Н. Муру, 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

В.Н. Половинкин, д.т.н., профессор, научный руководитель предприятия, Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург

К.В. Рождественский, д.т.н., профессор, проректор по международному сотрудничеству, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург



ISSN № 2588-0233 (print)
ISSN № 2073-7173 (on line)

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor

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

Editorial Staff Deputy Chief Editors

A.I. Gaykovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

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

A.I. Frumen, PhD (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

P.A. Shaub, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Shipbuilding & Shiprepair Technology Center, St. Petersburg, Russia

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

Members of Editorial Staff

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

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

Yu.A. Vlasov, PhD (Phys & Math), Adjunct Professor, Florida International University, Miami, FL, USA

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

V.A. Evteev Phd (Eng.), United Shipbuilding Corporation, St. Petersburg, Russia

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

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

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

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

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

Editorial Board Co-chairmen

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

Council Members

E.M. Appolonov, Dr. Sci. (Eng.), General Director, Lazurit Central Design Bureau JSC, Nizhny Novgorod, Russia

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

G.N. Muru, Cand. Sci. (Eng), CEO, 51 CCIS, St. Petersburg, Russia

S.A. Ogai, Doctor of Engineering, 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

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

K.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:**

- **Дмитрий Алексеевич Скороходов**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Олег Николаевич Петров**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Александрович Родионов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Анастасия Валерьевна Ткачева**, кандидат физ. – мат. наук, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН
- **Владимир Александрович Рыжов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Иван Иванович Костылев**, доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Александр Алексеевич Таранцев**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Галина Валентиновна Герман**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Иосифович Гайкович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Николай Васильевич Никитин**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Елена Борисовна Амбросовская**, кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” В.И.Ульянова (Ленина)
- **Андрей Владимирович Февральских**, кандидат технических наук, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
- **Юрий Александрович Власов**, кандидат физико-математических наук
- **Геннадий Петрович Кича**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Алексей Леонидович Стариченков**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
- **Владимир Борисович Мелехин**, доктор технических наук, профессор, профессор Дагестанский государственный технический университет
- **Сергей Владимирович Вербицкий**, кандидат технических наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Сергей Владимирович Антоненко**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет
- **Борис Петрович Ионов**, доктор технических наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Николай Николаевич Семенов**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Борис Федорович Дмитриев**, 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
- **Oleg N. Petrov**, Ph.D. (Eng), associate professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Alexander A. Rodionov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Anastasiia V. Tkacheva**, Ph.D. (Phys & Math), Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy, Far East Branch, Russian Academy of Sciences
- **Vladimir A. Ryzhov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Ivan I. Kostylev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Alexander A. Tarantsev**, Dr.Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Galina V. German**, Dr. Sci. (Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Aleksandr I. Gaikovich**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Nikolai V. Nikitin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Elena B. Ambrosovskaya**, Ph.D. (Eng), Associate Professor, St. Petersburg State Electrotechnical University (LETI)
- **Andrey V. Fevral'skikh**, Ph.D. (Eng), Moscow Aviation Institute (national research university)
- **Jurij A. Vlasov**, PhD (Phys & Math)
- **Gennadiy P. Kicha**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Maritime State University named Admural G. I. Nevel'skoy
- **Alexey L. Starichenkov**, Dr. Sci. (Eng), professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
- **Vladimir B. Melekhin**, Dr. Sci. (Eng), professor, Dagestan State Technical University
- **Sergej V. Verbickij**, Ph.D. (Eng), associate professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Sergey V. Antonenko**, Dr. Sci. (Eng), professor, Far Eastern Federal University
- **Boris P. Ionov**, Dr. Sci. (Eng), St. Petersburg State Marine Technical University
- **Nikolai N. Semenov**, Ph.D. (Eng), associate professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Boris F. Dmitriev**, Dr. Sci. (Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg

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



ТРУДЫ

**VI ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ**

«ПОЛЯРНАЯ МЕХАНИКА»

СОДЕРЖАНИЕ

стр.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

Веселов В.А., Китаев М.В., Суров О.Э., Новосельцев И.А. Влияние ледостойких защитных покрытий на эффективность судов.....	10
Благовидова И.Л., Иванова О.А. Проектирование ледостойкого сооружения для морского бурения в условиях Арктики.....	15
Кузнецов Э.А., Кулеш В.А., Суров О.Э., Фам Х.Ч. Проблемы ледовой регламентации не «эталонных» конструкций.....	23

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Калинина Н.В., Жуков А.Е., Золотов Н.В. Модернизация оборудования для буксировочных испытаний моделей судов ледового плавания в НГТУ.....	30
Двойченко Ю.А., Кулепов В.Ф., Садекова Е.В., Себин А.С. Определение допустимой массы груза, выгружаемого с судна на кромку льда.....	39
Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Тихонова Н.Е., Хрунков С.Н. Определение сопротивления сплошного льда движению ледокола с помощью модельного эксперимента.....	45
Добродеев А.А., Родионов Н.Ю., Архипов Г.А. Особенности комплектации пропульсивного комплекса крупнотоннажных транспортных судов ледового плавания.....	51
Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Новый подход к определению ледовой нагрузки на инженерные сооружения для сценария предельной кинетической энергии.....	58
Семенова Н.М., Двойченко Ю.А. К вопросу об определении сопротивления разрушения льда платформами на воздушной подушке.....	65
Блинов К.Д., Ларин А.Г., Панченко М.А., Панакушин М.А. Экспериментальное исследование ледового сопротивления модели ледокола проекта 21900 в опытовом бассейне.....	71
Земляк В.Л., Козин В.М., Васильев А.С. Экспериментальное определение параметров движения погруженного тела и волнообразования в ледовых условиях.....	77
Панакушин М.А., Ларин А.Г., Блинов К.Д., Панченко М.А. Прогнозирование ходкости речного ледокола проекта 1105 с использованием модельного эксперимента.....	88
Себин А.С., Блинов К.Д., Двойченко Ю.А. Исследование композитной модели ледяного покрова (GP-ice), составленной из одного слоя гранул сферической формы диаметром 20 мм.....	94
Крыжевнич Г.Б. Рациональное конструирование гидроразжимных соединений свай с основаниями ледостойких стационарных платформ.....	106
Миронов А.А., Кикеев В.А. Вариант построения двухкритериальной диаграммы разрушения цилиндрических оболочек с трещинами.....	112

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

Сахаров А.Н. Механическая модель взаимодействия дрейфующего льда с протяженным сооружением.....	116
Цуприк В.Г. Разработка методологии расчета параметров циклической ледовой нагрузки от ледовых полей на морские объекты.....	122
Карасева С.А., Папунин А.В., Беяков В.В., Макаров В.С., Малахов Д.Ю., Ключкин А.А. Анализ гидродинамики взаимодействия структурных элементов полностью погруженных шнеков тандемной конструкции роторно-винтовых снегоболотоходов с водой.....	132
Князьков В.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния ледяного покрова.....	141

CONTENTS	page
DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS	
Vitaly A. Veselov, Maksim V. Kitaev, Oleg E. Surov, Igor A. Novoseltsev Influence of ice-resistant protective coatings to vessels efficiency.....	10
Irina L. Blagovidova, Olga A. Ivanova Design of an ice-resistant structure for offshore drilling in the conditions of the Arctic.....	15
Eduard A. Kuznetsov, Victor A. Kulesh, Oleg E. Surov, Hiep C. Pham Problems of ice regulation of non-«standard» structures.....	23
THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS	
Nadezhda V. Kalinina Alexander E. Zhukov, Nikolai V. Zolotov Modernization of equipment for towing tests of models of ice navigation vessels at NNSTU.....	30
Yuri A. Dvoichenko, Viktor F. Kulepov, Evgenia V. Sadekova, Andrei S. Sebin Determination of the permissible weight of cargo unloaded from the vessel to the ice edge.....	39
Eugene M. Gramuzov, Nadezhda V. Kalinina, Natalya E. Tikhonova, Sergey N. Khrunkov Determination of solid ice resistance to icebreaker movement using a model experiment.....	45
Dobrodeev A.A., Rodionov N.Yu., Arhipov G.A. Peculiarity of the designing the propulsion complex for large-tonnage ice-class transport vessels.....	51
Aleksei A. Dobrodeev, Kirill E. Sazonov A new approach to determining the ice load on marine engineering structures for the critical kinetic energy scenario.....	58
Natalya M. Semenova, Yuri A. Dvoichenko Ice failure resistance determination by air cushion platforms.....	65
Kirill D. Blinov, Alexander G. Larin, Maxim A. Panchenko, Matvey A. Panakushin Experimental study of ice resistance of the icebreaker model of project 21900 in the towing tank.....	71
Vitaliy L. Zemlyak, Viktor M. Kozin, Alexey S. Vasilyev Experimental determination of the motion parameters of a submerged body and wave formation in ice conditions.....	77
Matvey A. Panakushin, Alexander G. Larin, Kirill D. Blinov, Maxim A. Panchenko Predicting the ice seaworthiness of the Project 1105 river icebreaker using a model experiment	88
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.....	94
Gennady B. Kryzhevich Rational design of hydro-flassable connections of piles with the bases of ice-resistant stationary platforms.....	106
Anatoliy A. Mironov, Vasiliy A. Kikeev Variant of constructing a two-criterion diagram of the failure of cylindrical shells with cracks.....	112
MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES	
Alexandr N. Sakharov Mechanical model of drifted ice interaction of wide offshore structure.....	116
Vladimir G. Tsuprik Development of methodology for calculating parameters of cyclic ice load from ice fields on marine objects.....	122
Svetlana A. Karaseva, Aleksey V. Papunin, Vladimir V. Belyakov, Vladimir S. Makarov, Dmitriy YU. Malahov, Anton A. Klyushkin Analysis of hydrodynamics of interaction between structural elements of full-submerged tandem Archimedes screws of rotary-screw snow and swamp-going vehicles and water.....	132
Vladimir V. Knyazkov Modeling of the stress-strain state of the ice cover.....	141

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS

Научная статья

УДК 629.5.016

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.037>

Влияние ледостойких защитных покрытий на эффективность судов

В.А. Веселов¹ veselov.va@dvfu.ru, М.В. Китаев^{1,2} maxkit@mail.ru, О.Э. Суров^{1,2} surov-oe@rambler.ru,
И.А. Новосельцев¹ novoseltcev.ia@dvfu.ru

¹Дальневосточный федеральный университет, ² Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. Ледостойкие лакокрасочные защитные покрытия предназначены для защиты наружной обшивки судов от ледовых воздействий. При проектировании такие покрытия позволяют уменьшить требуемую толщину наружной обшивки корпуса, что позволяет уменьшить построечную массу корпуса. От характеристик и качества защитных покрытий зависит сопротивление трения, расход топлива, выбросы в атмосферу, срок службы корпуса и ресурс судовой энергетической установки, т.е. функциональная и экономическая эффективность судна в целом. С целью оценки влияния ледостойких защитных покрытий на эксплуатационно-экономические показатели и функциональную эффективность судов ледового плавания в настоящей статье приводятся результаты лабораторных испытаний ледостойких защитных покрытий, применяемых в судостроении для защиты наружной обшивки ледоколов и судов ледового плавания и имеющих свидетельство о типовом одобрении Российского морского регистра судоходства. Выполнена оценка эффекта от применения ледостойких защитных лакокрасочных покрытий, имеющих разные значения коэффициента трения о лед, на ходкость и экологичность. Отмечено, что эффект от применения лучших образцов ледостойких защитных лакокрасочных покрытий может достигать от 10 до 20%.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, ледовое сопротивление, коэффициент трения, защитные покрытия, морские суда

Финансирование: работа выполнена согласно плану прикладных научных исследований, проводимых федеральными государственными бюджетными образовательными учреждениями высшего образования, подведомственными Росрыболовству, в рамках научного проекта № 824/2023.

Для цитирования: В.А. Веселов, М.В. Китаев, О.Э. Суров, И.А. Новосельцев. Влияние ледостойких защитных покрытий на эффективность судов, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 3, С. 10—14. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.037

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.037>

The effect of ice-resistant coatings to vessels efficiency

Vitaly A. Veselov¹ veselov.va@dvfu.ru, Maksim V. Kitaev^{1,2} maxkit@mail.ru, Oleg E. Surov^{1,2} surov-oe@rambler.ru,
Igor A. Novoseltsev¹ novoseltcev.ia@dvfu.ru

¹Far Eastern Federal University, ²Far Eastern State Technical Fisheries University

Abstract. Ice-resistant coatings are used to protect the ice going vessels from the weather and ice impactation. Such coatings reduce the required shall plating thickness and structural mass at vessel design stage. Quality and specification characteristics of ice-resistant coatings are effect on friction resistance, fuel consumption, emissions, hull strength and service life of the ship's power plant, i.e., the functional and economic efficiency of the vessel. At present paper the results of laboratory tests of ice-resistant protective coatings, applied in shipbuilding industry to icebreakers and ice navigation vessels shall plating protection are presented. Ice-resistant coatings which were tested in out laboratory have type approval certificates of the Russian Maritime Register of Shipping. The effect of the use of ice-resistant coatings with different values of ice friction to the propulsion and ecological efficiency of the vessel are presented. It is shown that the effect of using of the best types of ice-resistant protective coatings can reach from 10 to 20%.

Key words: energy efficiency, ice resistance, friction coefficient, protective coatings, marine vessels

For citation: Vitaly A. Veselov, Maksim V. Kitaev, Oleg E. Surov, Igor A. Novoseltsev. The effect of ice-resistant protective coatings to vessels efficiency Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 3, P. 10—14. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.037

Введение

При движении судна во льдах трение обшивки приводит к увеличению потерь энергии. Для снижения трения обычных водоизмещающих судов

обшивку очищают и окрашивают специальными покрытиями, снижающими трение и препятствующими обрастанию корпуса при стоянке в портах. В отличие от обычных судов, к покрытиям судов ледового плавания, предъявляются особые

требования [1]. Такие покрытия должны защищать корпус в самых суровых эксплуатационных условиях, обладать повышенной стойкостью, прочностью и снижать трение корпуса судна о лед [2, 3], что благоприятно сказывается на экономической и функциональной эффективности судна - снижается расход топлива и выбросы CO₂, увеличивается срок службы наружной обшивки и ресурс главной энергетической установки.

Покрытия, одобренные классификационными обществами [4], на предмет устойчивости к истиранию льдом способны обеспечить такую защиту и преимущества при эксплуатации судна в ледовых условиях. Покрытия разных производителей отличаются по характеристикам и по-разному влияют на эксплуатационные показатели и эффективность судна при движении во льдах [5, 6]. Представляется целесообразным проведение исследования с целью сравнительной оценки коэффициентов трения о лед различных типов покрытий.

В статье приводятся результаты испытаний по определению значений коэффициента трения о лед различных ледостойких защитных покрытий и выполнен анализ влияния коэффициента трения на общую эффективность судна при движении во льдах.

Требования к испытаниям ледостойких защитных покрытий

Для судов ледового плавания и ледоколов применяют специальные ледостойкие лакокрасочные покрытия (ЛЛКП), имеющие низкие значения коэффициента трения о лед.

ЛЛКП перед применением на судах в обязательном порядке подлежат сертификации в классификационных обществах, наблюдающих за проектированием, постройкой и эксплуатацией судов, например, РМРС.

В соответствии с требованиями Правил [1] Российского морского регистра судоходства (РМРС) ЛЛКП считается покрытие, которое способно обеспечивать защиту наружной обшивки корпуса судна от внешних воздействий в условиях ледового плавания. Применение таких покрытий позволяет уменьшить требуемую Правилами толщину наружной обшивки, что ведет к уменьшению массы конструкции корпуса, снижает затраты на постройку и повышает эффективность судна в целом [5, 7, 8].

Критерии, используемые при испытаниях, сертификации ЛЛКП и дальнейшем получении свидетельства о типовом одобрении покрытия РМРС [1], приведены в табл. 1.

Таблица 1

Критерии оценки ЛЛКП

Наименование показателя	Значение	
	Класс I	Класс II
Коэффициент трения о лед	$\leq 0,05$	$\leq 0,08$

Испытания фрикционных свойств покрытий, согласно установленным требованиям п. 2.5.7 Правил РМРС [1], проводятся при следующих условиях: температура окружающей среды минус 20°C; относительная влажность окружающего воздуха не более 85%; атмосферное давление 1 бар.

Вследствие сил трения между контактирующими поверхностями образца и льда они могут оставаться неподвижными относительно друг друга до тех пор,

пока сила, сдвигающая образец, не станет больше силы трения покоя между поверхностями. Это максимальное первоначальное значение силы отмечается как сила, соответствующая коэффициенту статического трения (μ_s). При помощи тензометрических датчиков отмечается наблюдаемое на шкале индикатора среднее значение силы при равномерном движении поверхностей относительно друг друга в течение 1 мин. Эта сила равна силе трения скольжения, необходимой для поддержания равномерного, прямолинейного движения поверхностей относительно друг друга и соответствует коэффициенту трения скольжения (μ_k).

Определение коэффициентов трения ЛЛКП о лед

Авторами статьи были испытаны 15 образцов ЛЛКП различных производителей, внешний вид которых показан на рис. 1. Перечень производителей и количество предоставленных для испытаний ЛЛКП приведены в табл. 2, результаты испытаний показаны на рис. 2.

Таблица 2

Производители ЛЛКП

Производитель	Обозначение (номер) покрытия (см. рис.1)
ООО «ППГ Индастриз»	1 - 6
«Jotun Co. Ltd.»	7 - 9
«Hempel Korea Co. Ltd.»	10
АО «Русские краски»	11
Компания Акрус	12
ЗАО «Эмлак»	13, 14
ООО «НПО 812»	15

Из представленных на рис. 2 данных видно, что коэффициенты трения скольжения ЛЛКП имеют:

- шесть образцов $\mu_k \leq 0,035$;
- четыре образца $0,035 \leq \mu_k \leq 0,050$;
- пять образцов $0,050 \leq \mu_k \leq 0,080$.

Таким образом, $\frac{2}{3}$ испытанных ЛЛКП соответствует I классу (см. табл. 1) и могут использоваться для всех судов ледового класса.

Влияние коэффициента трения на ледовое сопротивление

При малых скоростях хода при движении судна во льдах, силы трения вносят весомый вклад в результирующую сопротивление. По данным [9], сила трения об лед составляет порядка 30% от всех сил, противодействующих движению судна во льдах. Значения составляющих ледового сопротивления показаны в табл. 3.



Рис. 1. Испытываемые образцы ЛЛКП

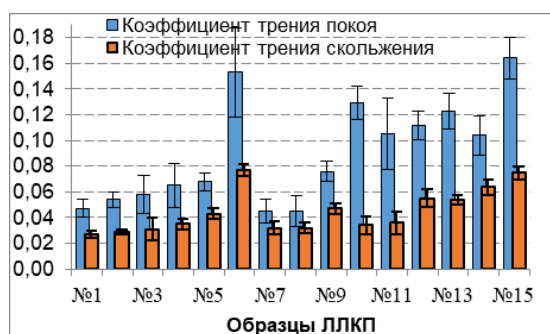


Рис. 2. Результаты испытаний

Таблица 3

Составляющие сопротивления ледокола
«Москва», %

Относительные составляющие ледового сопротивления	R ₁ /R		R ₂ /R		R ₃ /R		R _F /R
	R _σ /R	R _{fσ} /R	R _S /R	R _{fS} /R	R _V /R	R _{fV} /R	
Расчетные значения по уточненной формуле	49,1		39,2		11,7		29,1
	34,3	14,8	28,0	11,2	8,6	3,1	
Расчетные значения по приближенной формуле	51,2		36,9		11,9		28,5
	36,1	15,1	26,3	10,6	9,1	2,8	
Эксперимент	46,5		40,6		12,9		30,0

В табл. 3 указаны сопротивления: R – полное ледовое; R₁ – разрушению льда; R₂ – обусловленное притапливанием льда и его поворачиванием; R₃ – раздвиганию разрушенного ледяного покрова; R_F – полное сопротивление трения.

При этом полное ледовое сопротивление можно представить [9]:

$$R = R_{\sigma} + R_{f\sigma} + R_S + R_{fS} + R_V + R_{fV} + R_B. \quad (1)$$

$$R_{\sigma} + R_{f\sigma} = R_1; R_S + R_{fS} = R_2; R_V + R_{fV} = R_3;$$

где сопротивление: R_σ – разрушению льда; R_{fσ} – при разрушении льда; R_S – притапливанию и поворачиванию разрушенного льда; R_{fS} – при притапливании и поворачивании разрушенного льда; R_V – раздвиганию льда; R_{fV} – при раздвигании льда; R_B – на чистой воде.

Следовательно, полное сопротивление трения запишется как:

$$R_F = R_{f\sigma} + R_{fS} + R_{fV} \quad (2)$$

При расчетах силы сопротивления в табл. 3 принималось значение коэффициента трения μ_к=0,080 [9]. В результате выполненных испытаний 15 образцов, авторами были получены: максимальное значение коэффициента трения 0,077, а минимальное 0,027. Исходя из полученных результатов, следует ожидать, что применение лучших образцов ЛЛКП приведет к уменьшению сопротивления трения судна о лед в 2,85 раза. Это позволит уменьшить значение полного сопротивления судна во льдах на ~20%. Данный эффект максимальный и соответствует эксплуатации судна в сплошных льдах предельной толщины, что более характерно для судов арктического плавания и ледоколов. Как правило, в реальных условиях такой режим эксплуатации составляет не более 50% от общей длительности рейса судна. Соответственно, реальный эффект от применения

лучших ЛЛКП по коэффициенту трения о лед в среднем может достигать 10%.

Оценка эффекта от применения ЛЛКП

Буксировочная мощность P определяется по формуле:

$$P = R \cdot v \quad (3)$$

где v – скорость хода судна; R – сопротивление во льдах.

Если силу сопротивления уменьшить на 10%, то, согласно выражению (3), должна уменьшиться мощность (4) либо, при постоянной мощности увеличиться скорость хода судна (5).

$$0,9P = 0,9R \cdot v \quad (4)$$

$$P = 0,9R \cdot 1,11v \quad (5)$$

Применение ЛЛКП позволяет получить выигрыш в массе судна и мощности энергетической установки, увеличение скорости, а следовательно, снижение затрат на перевозку грузов.

Экологический эффект от применения ЛЛКП с минимальными значениями коэффициентов трения о лед заключается в уменьшении выбросов CO₂ в атмосферу при сжигании топлива. Согласно [4] максимальный выброс i -го вещества, г/с, дизельной установкой рассчитывают по формуле [4]:

$$M_i = e_{Mi} \cdot P_3 / 3600 \quad (6)$$

где e_{Mi} – выброс i -го вредного вещества на единицу полезной работы стационарной дизельной установки в режиме номинальной мощности г/кВт·ч (значение e_{Mi} определяется на основании ГОСТ [10]); P_3 – мощность энергетической установки.

Результаты анализа влияния характеристик ЛЛКП на эффективность судов при движении во льдах показаны в табл. 4.

Таблица 4

Оценка эффекта от применения ЛЛКП

μ _к	0,080	0,070	0,060	0,050	0,040	0,003	0,027
R, кН	1981	1909	1837	1765	1694	1622	1600
P ₃ , кВт	3962	3818	3674	3531	3387	3243	3200
M _{CO} , г/с	7,92	7,64	7,35	7,06	6,77	6,49	6,40
M _{NOx} , г/с	11,89	11,45	11,02	10,59	10,16	9,73	9,60
M _{CH} , г/с	3,96	3,82	3,67	3,53	3,39	3,24	3,20
M _C , г/с	0,66	0,64	0,61	0,59	0,56	0,54	0,53
M _{SO2} , г/с	1,32	1,27	1,22	1,18	1,13	1,08	1,07
M _{CH2O} , г/с	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13
M _{бенз(а)пире} н, г/с * 10 ⁻⁵	1,43	1,38	1,33	1,27	1,22	1,17	1,16

Из вышеприведенных данных видно, что количество выбросов прямо пропорционально мощности энергетической установки.

Для оценки эффекта от применения ЛЛКП в расчетах по формулам (4-6) в качестве P_3 можно принимать значение номинальной мощности стационарной дизельной установки (N_e), кВт [10].

Выводы

ЛЛКП, разрабатываемые для ледоколов и судов ледового плавания, проходят обязательную сертификацию классификационными обществами и способны защищать корпус судна в самых суровых эксплуатационных условиях. Такие покрытия оказывают существенное влияние на проектные и

эксплуатационно-экономические показатели: позволяют уменьшить требуемую толщину наружной обшивки корпуса и снижают построечный вес корабля, увеличивают срок службы наружной обшивки и моторесурс главной энергетической

установки, снижают нагрузку, расход топлива и выбросы вредных веществ в атмосферу, т.е. прямым образом влияют на функциональную и экономическую эффективность судов ледового плавания

Литература

1. Правила классификации и постройки морских судов, часть XIII «Материалы», Российский морской регистр судоходства, СПб., 2023.
2. Атрушкевич Е.Б., Соминская Э.В., Хитов Е.С. Эффективность защиты судов от коррозии в Арктике // Судостроение. 2017. №2. С 41-44.
3. Данилов Н.В., Соминская Э.В., Трусов В.И. Ледостойкие системы противокоррозионной защиты // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 2-1 (44). С. 111-114.
4. Российский морской регистр судоходства. Промышленность: официальный сайт [Электронный ресурс]. 2023. <https://lk.rs-class.org/regbook/industry> (дата обращения: 07.08.2023).
5. Veselov V.A., Kitaev M.V., Pastukhov P.O., Surov O.E. Tests of paint and varnish ice-resistant protective coatings of ice class vessels / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – № 986. – P. 1 - 11.
6. Лебедев О.Ю., Мензилова М.Г., Филь А.В., Степанов С.В. Экспериментальные исследования воздействия низких температур на ледостойкие и противообрастающие покрытия // Эксплуатация морского транспорта. 2023. № 2 (107). С. 181-187.
7. Кулеш В.А. Надбавка коррозионного износа на коррозионный износ наружной обшивки судов для работы во льдах // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 3-2 (37). С. 52-57.
8. Китаев М.В., Компанец В.А., Кулеш В.А., Суров О.Э. Разработка предложений к назначению надбавок на износ наружной обшивки судов ледовых классов и ледоколов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2018. № 52-53. С. 35-46.
9. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов / – СПб.: Судостроение, 2013. – 504 с.
10. ГОСТ Р 56163-2014. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, Метод расчета выбросов от стационарных дизельных установок; введ. 2015-07-01. – 2015. – 6 с.

References

1. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov, part XIII «Materials» [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships, Part XIII Materials], Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. SPb., 2023.
2. Atrushkevich E.B., Sominskaya E.V., Khitov E.S. Effektivnost' zashchity sudov ot korrozii v Arktike [Efficiency of ship's corrosion protection in arctic region] // Sudostroenie. 2017. №2. S 41-44.
3. Danilov N.V., Sominskaya E.V., Trusov V.I. Ledostoykie sistemy protivokorroziionnoy zashchity [Ice resistant anti-rose protection systems] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 2-1 (44). S. 111-114.
4. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. Promyshlennost': ofitsial'nyy sayt [Russian Maritime Register of Shipping. Industry] [Elektronnyy resurs]. 2023. <https://lk.rs-class.org/regbook/industry> (data obrashcheniya: 07.08.2023).
5. Veselov V.A., Kitaev M.V., Pastukhov P.O., Surov O.E. Tests of paint and varnish ice-resistant protective coatings of ice class vessels / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – №986. – P. 1 - 11.
6. Lebedev O.Yu., Menzilova M.G., Fil' A.V., Stepanov S.V. Eksperimental'nye issledovaniya vozdeystviya nizkikh temperatur na ledostoykie i protivoostrastayushchie pokrytiya [Experimental studies of the effect of low temperatures on ice-resistant and anti-fouling coatings] // Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2023. № 2 (107). S. 181-187.
7. Kulesh V.A. Nadbavka korroziionnogo iznosa na korroziynny iznos naruzhnoy obshivki sudov dlya raboty vo l'dakh [Corrosion wear additives of shell of ships operation in ice] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2017. № 3-2 (37). S. 52-57.
8. Kitaev M.V., Kompanets V.A., Kulesh V.A., Surov O.E. Razrabotka predlozheniy k naznacheniyu nadbavok na iznos naruzhnoy obshivki sudov ledovykh klassov i ledokolov [Development of proposals for wear values of the shell plating of ice class ships and icebreakers] // Nauchno-tekhnicheskiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. 2018. № 52-53. S. 35-46.
9. Ionov B.P., Gramuzov E.M., Ledovaia hodkost sudov [ice resistance of ships.] / SPb.: Sudostroenie, 2013.s-504.
10. GOST R 56163-2014. Vibrosi zagraznaushih veshstv v atmosferu, Metod rascheta vibrosov ot stachionarnih diesel'nykh ystanovok [Air pollution emissions. Method of calculating emissions from stationary diesel engines]; vved. 2015-07-01.-2015. -6 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

Виталий Алексеевич Веселов, аспирант департамента Морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: veselov.va@dvfu.ru

Максим Владимирович Китаев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник научного управления, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, г. Владивосток, ул. Луговая, д. 52 Б, кандидат технических наук, доцент, доцент департамента Морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: maxkit@mail.ru

Олег Эдуардович Суров, кандидат технических наук, старший научный сотрудник научного управления, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, г. Владивосток, ул. Луговая, д. 52 Б, кандидат технических наук, доцент, профессор департамента Морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: surov-oe@rambler.ru

Игорь Александрович Новосельцев, аспирант департамента Морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: novoseltcev.ia@dvfu.ru

Vitaly A. Veselov, postgraduate student of the Department of Marine Engineering and Transport, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922, e-mail: veselov.va@dvfu.ru

Maksim V. Kitaev, Ph.D. (Eng), senior researcher of the scientific department, Far Eastern State Technical Fisheries University, 690087, Vladivostok, Lugovaya str., 52 B, candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Marine Engineering and Transport, Far Eastern Federal University, 690922, Vladivostok, Russian Island, Ajax, 10, e-mail: maxkit@mail.ru

Oleg E. Surov, Ph.D. (Eng), senior researcher of the scientific department, Far Eastern State Technical Fisheries University, 690087, Vladivostok, Lugovaya str., 52 B, candidate of technical sciences, associate professor, professor of the Department of Marine Engineering and Transport, Far Eastern Federal University, 690922, Vladivostok, Russian Island, Ajax, 10, e-mail: surov-oe@rambler.ru

Igor A. Novoseltsev, postgraduate student of the Department of Marine Engineering and Transport, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922 e-mail: novoseltcev.ia@dvfu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 27.06.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 02.08.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 14.08.2023.

Научная статья

УДК 629.563.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.038>

Проектирование ледостойкого сооружения для морского бурения в условиях Арктики

И.Л. Благовидова^{1,2} blagovidova@yandex.ru, О.А. Иванова^{1,2} o.a.ivanova.kmt@mail.ru,¹Севастопольский государственный университет, ²ЦКБ «Коралл»

Аннотация. Авторами работы выполнен анализ существующих отечественных и зарубежных концепций буровых установок, способных вести разведочное бурение в ледовых условиях. Сформированы архитектурно-конструктивные решения по ледостойкой буровой платформе, предназначенной для круглогодичного разведочного бурения в условиях Арктики. Предложена концепция разделения морской буровой установки на составные части (стальную платформу и железобетонную подставку) с возможностью их отдельной транспортировки и установки на точке эксплуатации, определены преимущества данной концепции. Выполнен комплекс расчетов, подтверждающих жизнеспособность платформы, направленных на оценку принятия оптимальной формы с точки зрения восприятия ледовых нагрузок, обеспечения устойчивости. Определен общий подход к выбору минимально допустимых характеристик грунтового основания, их несущая способность для вариантов эксплуатации буровой установки без железобетонной подставки и с подставкой.

Ключевые слова: анализ, ледовые воздействия, буровая платформа, глубина моря, экстремальные нагрузки, оценка устойчивости.

Для цитирования: Благовидова И.Л., Иванова О.А. Проектирование ледостойкого сооружения для морского бурения в условиях Арктики. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 3, С. 15—22. DOI: (проставляется в журнале при публикации) 10.37220/MIT.2023.61.3.038

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.038>

Design of an ice-resistant structure for offshore drilling in the conditions of the Arctic

Irina L. Blagovidova^{1,2} blagovidova@yande.ru, Olga A. Ivanova^{1,2} o.a.ivanova.kmt@mail.ru,¹Sevastopol State University, ²Central Design Bureau "Corall"

Abstract. The authors of the work analyzed the existing domestic and foreign concepts of drilling rigs capable of conducting exploratory drilling in ice conditions. Architectural and structural solutions for an ice-resistant drilling platform designed for year-round exploratory drilling in the Arctic have been formed. The concept of separating the offshore drilling rig into its component parts (steel platform and reinforced concrete stand) with the possibility of their separate transportation and installation at the point of operation is proposed, the advantages of this concept are determined. A set of calculations was performed to confirm the viability of the platform, aimed at assessing the adoption of the optimal form in terms of the perception of ice loads, ensuring stability. A general approach to the selection of the minimum acceptable characteristics of the soil base, their bearing capacity for the options for operating a drilling rig without a reinforced concrete stand and with a stand is determined.

Key words: analysis, ice actions, drilling platform, sea depth, extreme loads, stability assessment.

For citation: Irina L. Blagovidova, Olga A. Ivanova, Design of an ice-resistant structure for offshore drilling in the conditions of the arctic. Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 3, P. 15—22. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.038

Введение

Шельфовая добыча нефти и газа является стратегически важной задачей для Российской Федерации [1]. Основные цели и направления по освоению шельфовой зоны изложены в «Стратегии развития арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г.» [2]. Представленная авторами статья полностью соответствует данному направлению и является актуальной.

Различные участки арктических морей РФ существенно отличаются своими природными условиями. Для обустройства месторождений на незамерзающих акваториях или при бурении в период «открытой» воды неглубоких разведочных скважин имеются промышленно отработанные

технические решения. На других участках, где природные условия значительно сложнее, наличие дрейфующих и припайных льдов в течение 7-11 месяцев в году, возникает потребность в проектировании технических средств в ледостойком исполнении для круглогодичной эксплуатации на месторождениях. Анализ по глубинам лицензионных участков арктической зоны РФ показал, что для большей части рассматриваемых лицензионных участков характерны глубины порядка 60 м.

Технические средства для обеспечения круглогодичного поисково-разведочного бурения в ледовых условиях и на глубинах в диапазоне 30-60 м в Российской Федерации и за рубежом в настоящее время отсутствуют. На сегодняшний день на значительной части лицензионных участков арктического шельфа поисково-разведочные работы

еще не проводились. Таким образом, создание оффшорных сооружений для круглогодичного поисково-разведочного бурения в замерзающих акваториях является важнейшим условием освоения ресурсов российских арктических территорий и представляет собой техническую задачу, решение которой позволит расширить диапазон глубин осваиваемых месторождений и повысит эффективность морского бурения.

Основной задачей работы является разработка концептуальных решений по морскому ледостойкому нефтегазовому сооружению, предназначенному для освоения шельфа Арктики в режиме круглогодичного поисково-разведочного бурения, с целью получения решений, подтверждающих или опровергающих возможность дальнейшей реализации проекта в постройке и эксплуатации.

Анализ существующих концепций мобильных буровых платформ для освоения шельфа Арктики

Анализ концепций проектов ледостойких буровых платформ показал, что в настоящее время погружные буровые установки являются единственным типом мобильных установок, которые могут обеспечить круглогодичное бурение в арктических условиях [5, 6]. На ранних этапах создания ледостойких платформ для эксплуатации в замерзающих морях появились две базовые концепции – создание больших кессонных платформ, которые бы выдерживали навал льда, либо же платформ на сравнительно тонких опорах, которые бы пропускали лед, разрезая опорами его поля.

Буровые установки, предназначенные для выполнения поисково-разведочного бурения, во-первых должны обладать мобильностью – иметь возможность снятия и перехода (транспортировки) в рассматриваемых регионах. Во-вторых, для обеспечения устойчивости в сложных климатических условиях, они должны обладать достаточной прижимной нагрузкой. При этом для возможности транспортировки платформы по трассе Северного морского пути необходимо, чтобы ее осадка в транспортном положении не превышала 11 м.

Самыми первыми мобильными решениями для разведочного бурения в сложных климатических условиях замерзающих морей были погружные буровые установки для шельфа Канады: SSDC, «Molikraaq», «Glomar Beaufort sea I». Глубины на местах эксплуатации этих платформ не превышали 20-30 м. Для всех этих платформ в качестве опорного основания применялся кессон.

За предыдущие годы было выполнено большое количество концептуальных проектов мобильных платформ для выполнения круглогодичного поисково-разведочного бурения в тяжелых ледовых условиях как российскими, так и зарубежными компаниями. Из российских компаний можно отметить разработки АО «ЦКБ «Коралл», ЦКБ МТ «Рубин», Крыловского государственного научного центра и др. Среди зарубежных компаний наиболее

интересный проект предложен норвежской компанией Kvaerner. Компанией была разработана концепция морской мобильной буровой установки с многоколонным опорным основанием, для круглогодичного разведочного бурения в условиях Арктики для диапазона глубин 20-60 м – «Condriill» (рис. 1). Однако, при детальном рассмотрении, представленная концепция имеет ряд ограничений, связанных со значительной транспортной осадкой (около 20 м), не позволяющей транспортировку платформы по Северному морскому пути, а также дефицитом устойчивости при погружении на предельные глубины. Также к недостаткам концепции можно отнести то, что при установке на глубинах 20-30 м палуба верхнего строения будет располагаться на высоте более 50 м над уровнем моря, что в ледовых условиях крайне затруднит эвакуацию персонала и организацию доставки технологических и прочих запасов.

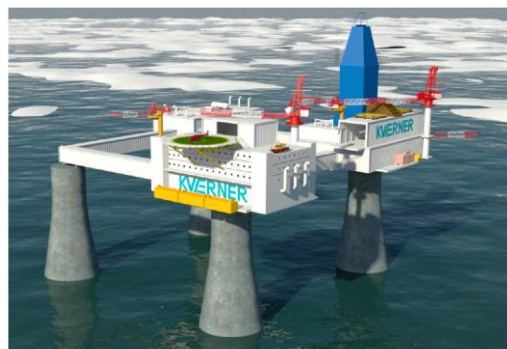


Рис. 1. Общий вид платформы «Condriill» фирмы «Kvaerner»

Конструктивные решения по буровым платформам, осуществляющим поисково-разведочного бурения в условиях Арктики

Анализ существующих технических средств, предназначенных для круглогодичной эксплуатации в ледовых условиях показал, что в настоящее время в мире и в РФ накоплен определенный опыт проектирования, постройки и эксплуатации сооружений, осуществляющих бурение в арктических условиях для диапазона глубин до 30 м. При этом следует отметить, что для осуществления поисково-разведочного бурения в сложных ледовых условиях Арктики для диапазона глубин 30-60 м на сегодняшний день мобильные буровые платформы отсутствуют [10].

На основании рассмотрения и изучения опыта проектирования, строительства и эксплуатации буровых установок в ледовых условиях в работе предложено новое конструктивное решение – применение комбинированного сооружения, состоящего из водоизмещающей ледостойкой металлической буровой платформы и железобетонной водоизмещающей подставки (рис. 2).



Рис. 2. Погружная комбинированная буровая установка с железобетонным опорным основанием (подставкой)

Предлагаемая буровая платформа представляет собой морское гравитационное сооружение и включает в себя кольцевое ледостойкое железобетонное опорное основание, позволяющее расширить диапазон эксплуатационных глубин, и установленное на нем верхнее строение в виде ледостойкой стальной буровой платформы, имеющей коническую наклонную поверхность для противодействия ледовым нагрузкам.

Форма опорной части предлагаемой стальной платформы имеет следующие особенности:

- симметрична во всех направлениях, что обеспечивает одинаковый уровень внешних воздействий вне зависимости от направления действующих нагрузок;

- в районе действующей ватерлинии наружные стенки имеют наклон, который позволяет снизить горизонтальную нагрузку от воздействия ледовых образований вследствие изменения характера их разрушения;

- корпус в районе действующей ватерлинии имеет малую площадь и правильную форму, что также способствует снижению уровня внешних нагрузок;

- в отличие от ватерлинии в рабочем состоянии, днище имеет большую площадь, обеспечивающую равномерное распределение нагрузок от веса сооружения и внешних нагрузок на грунтовое основание и позволяет создать достаточные удерживающие силы.

Для возможности эксплуатации платформы на больших глубинах до 60 м предусмотрено использование подставки, высота которой может варьироваться в зависимости от предполагаемых на месторождении глубин.

Основные требования, предъявляемые к подставке:

- устойчивое положение на грунте, в том числе при воздействии экстремальных нагрузок (гидрометеословий);

- сведение габаритных размеров к минимально возможному с соответствующим снижением массовых характеристик, но при обязательном обеспечении устойчивого положения буровой установки на грунте;

- размеры подставки не должны затруднять обеспечение ее остойчивости в процессе погружения на дно;

- подставка должна иметь достаточную площадь дна, чтобы отсутствовала опасность опрокидывания и проседания комплекса в грунт.

Наиболее предпочтительный вариант материала для изготовления такой подставки – железобетон, обеспечивающий большую прижимную нагрузку благодаря высокой массе, что в данном случае является положительным фактором, так как стальные конструкции для устойчивости на грунте часто приходится «пригружать» с помощью твердого балласта в виде песка, бетона или даже железорудного концентрата. Конструктивно подставка представляет собой объемную, восьмиугольную в плане конструкцию с вырезом во внутренней части, обеспечивающим прохождение буровой колонны и установку подводного устьевого оборудования в случае необходимости.

Наличие железобетонной подставки не только расширяет диапазон глубин, на которых может эксплуатироваться буровая установка, но и повышает ее мобильность, а именно упрощает уход с места эксплуатации.

В основе предлагаемой концепции лежит идея разделения сооружения на составные части с возможностью их отдельной транспортировки и установки на точке эксплуатации. Одним из преимуществ концепции разделения является то, что железобетонное опорное основание, непосредственно взаимодействующее с грунтовым основанием, имеет минимальный набор систем, необходимых для погружения и всплытия, и простую форму. А именно, процесс погружения/всплытия железобетонной подставки осуществляется без непосредственного присутствия на ней персонала, кроме того, в ней отсутствует какое-либо оборудование, чувствительное к большим углам наклона или ускорениям в процессе всплытия. Для такого сооружения не будет ограничений по углу дифферента в процессе погружения или всплытия, что значительно упрощает процесс установки на грунт [3, 4].

Основные характеристики комбинированной буровой платформы представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики стальной платформы и подставки

Характеристика	Стальная платформа	Подставка
Диапазон рабочих глубин, м	от 8–10 до 25–30	до 60
Материал корпуса	Сталь	Железобетон
Габаритные размеры, м	110x110	125x125
Масса, т	ок. 48 000	ок. 120 000
Высота подставки, м	–	до 30

Ограничения по глубине применения платформы (до 60 м) связаны, в первую очередь, с габаритной осадкой и размерами, а также со способом постановки железобетонной подставки.

При постановке на точку необходимо учитывать, что минимальная глубина моря должна гарантированно обеспечить отсутствие взаимодействия подставки с ледовыми образованиями, а также, по возможности, свести к минимуму волновое воздействие на нее.

На ограничение максимальной глубины моря значительное влияние оказывают вопросы, связанные с потерей остойчивости после погружения под воду верхней палубы железобетонной подставки. Для исключения неблагоприятного воздействия в процессе возможного неконтролируемого погружения железобетонная подставка должна погружаться либо с дифферентом, обеспечивающим положительную метacentрическую высоту в момент касания грунта одной из оконечностей, либо дополнительно поддерживаться извне, например с помощью плавучего крана, однако, принимая во внимание массогабаритные характеристики такой железобетонной подставки, обеспечение положительной остойчивости за счет плавучего крана будет достаточно проблематично.

Выбранные габаритные размеры позволяют погружать подставку с созданием дифферента около 14 градусов на глубину 60 м, при этом обеспечивают устойчивость комбинированной буровой платформы при воздействии экстремальных внешних нагрузок.

Для обеспечения соосности стальной платформы и железобетонной подставки при установке на дно, используется система, состоящая из направляющего конуса, конструктивно принадлежащего железобетонной подставке, и ответной улавливающей конструкцией стальной платформы. При этом угол между улавливающей конструкцией и направляющим конусом выбран из условия исключения заклинивания с учетом коэффициента трения между поверхностями контакта.

Установка железобетонного основания в эксплуатационное положение осуществляется за счет приема жидкого балласта. Осесимметричная форма опорной части и стальной платформы значительно упрощает процесс баллаستирования, так как параметры остойчивости имеют одинаковые значения при наклонениях в любом направлении, такая форма является универсальной с точки зрения создания дифферента и балластирования.

Оценка устойчивости комбинированной буровой установки для круглогодичной эксплуатации в условиях Арктики

Для оценки устойчивости платформы были определены внешние нагрузки: ледовая, ветровая и от течения. Расчеты воздействий на платформу проведены для особого сочетания нагрузок – ледовая нагрузка, как максимальная, определена с 0,1 % обеспеченностью.

Расчет ветровой нагрузки и нагрузки от течения, воздействующих на комбинированную платформу, проведен с использованием методик, рекомендуемых «Правилами классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ» Российского морского регистра судоходства [11].

Для оценки ледовой нагрузки на проектируемое сооружение проведен расчет по методикам, отраженным в следующих нормативно-технических документах:

– СП 38.13330.2018 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). СНиП 2.06.04-82*» [8];

– «Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ» Российского морского регистра судоходства;

– ISO 19906:2019 «Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures» («Нефтяная и газовая промышленность – Арктические морские сооружения») [12].

Нормативные значения нагрузок, определенных по указанным методикам, находятся в диапазоне 77–90 МН. Минимальная нагрузка получена по методике ISO 19906:2019, максимальная – по СП 38.13330.2018. Дополнительно выполнена верификация по результатам модельных испытаний опорного основания платформы, послужившей прототипом для проектируемой платформы (СМЛОП «Варандей») в ледовом опытовом бассейне ФГУП «КГНЦ».

На основе полученных данных о величине ледовых нагрузок и данных об инженерно-геологических условиях в арктическом регионе были выполнены расчеты устойчивости на грунте. Расчетные конечно-элементные модели (рис. 3) для проверки устойчивости комплексной буровой установки в условиях воздействия ледовых образований выполнены с учетом характера напластования грунтов, гидростатического давления

водяного столба жидкости и последовательности проведения морских операций по установке БУ в точке проведения поисково-разведочного бурения. Расчетные конечно-элементные модели выполнены

с использованием программного конечно-элементного комплекса для геотехнических расчетов Plaxis 3D Foundation

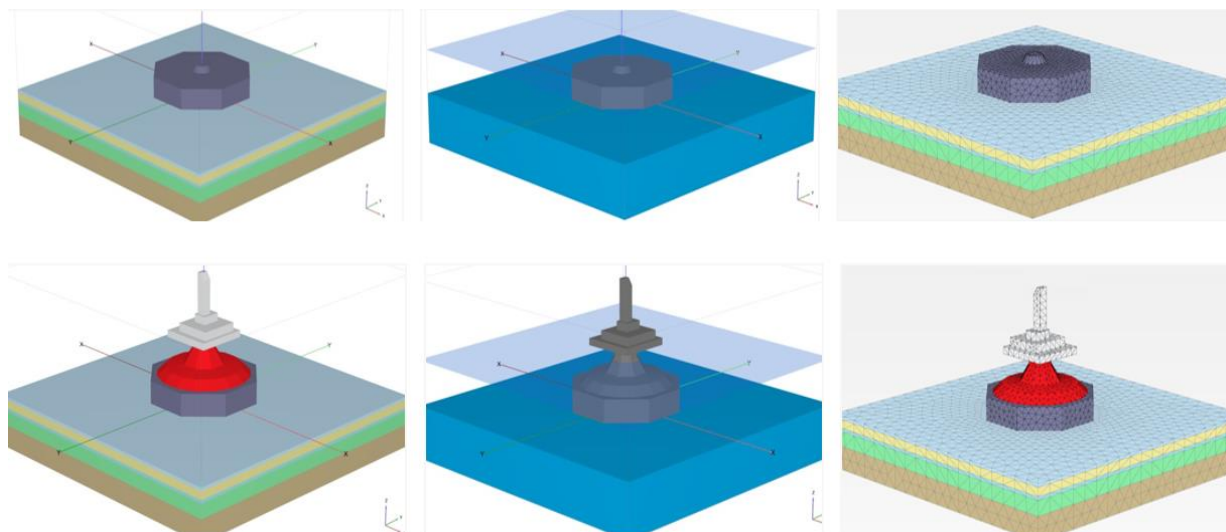


Рис. 3. Расчетные конечно-элементные модели погружной комбинированной буровой установки с железобетонным опорным основанием (подставкой)

Полученные результаты расчетов позволили оценить уровень напряженно-деформированного состояния грунтового основания и перемещений комбинированной буровой установки при эксплуатации в безледовый и ледовый периоды (рис. 4, 5). Общий подход определения минимально

допустимых характеристик грунтового основания заключается в определении максимальной нагрузки на грунт, с учетом воздействия экстремальных внешних условий, и далее определению соответствующих параметров грунтового основания, при которых не наступает его разрушения [9, 13, 14].

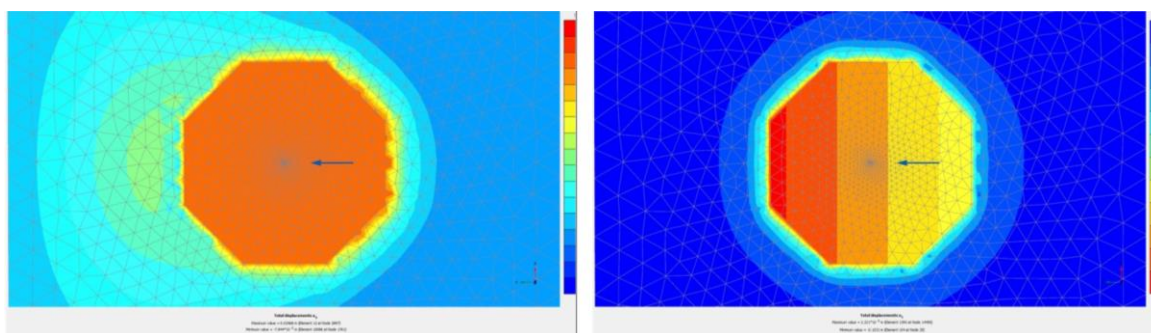


Рис. 4. Уровень смещений грунтового массива от совместного действия ледовой нагрузки и веса установки по осям приложенной нагрузки

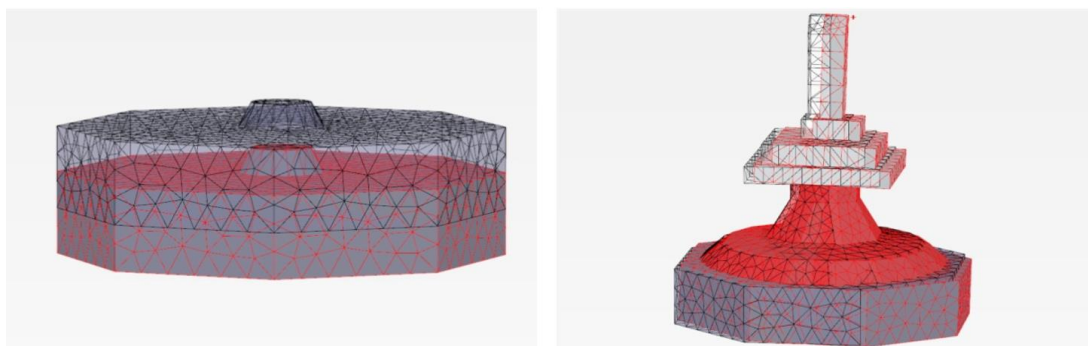


Рис. 4. Оценка устойчивости на грунте (начальное положение буровой установки и после приложения нагрузки)

При эксплуатации комбинированной буровой установки в комплексе с подставкой, расширяющей диапазон глубин, устойчивость против сдвига всей

конструкции вместе с верхним строением, в большей степени, обеспечивается за счет силы веса подставки, непосредственно опирающейся на грунт,

а прижимная нагрузка буровой установки должна обеспечивать ее устойчивость против опрокидывания.

В работе определены напряжения по контакту днища с грунтовым основанием, с учетом действия опрокидывающего момента. Для определения максимальных напряжений по контакту днища, возможных в процессе эксплуатации, принят диапазон расчетных горизонтальных нагрузок от 80 до 140 МН.

В результате расчетов определена несущая способность песчаного, глинистого, супесчаных и суглинистых грунтов – минимальные параметры грунта для варианта эксплуатации буровой установки без железобетонной подставки и с подставкой. Полученные в результате расчетов минимально допустимые характеристики грунтового основания для постановки на грунт комбинированной буровой установки, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчета (параметры грунтов)

Горизонтальная нагрузка, МН	Минимально допустимые характеристики грунтового основания			
	БУ		Подставка	
	Угол внутреннего трения φ, град.	Удельное сцепление с, кПа	Угол внутреннего трения φ, град.	Удельное сцепление с, кПа
Песчаные грунты				
80	16	–	> 22	–
110	17	–		–
140	18	–		–
Супеси и суглинки				
80	> 15	> 0	> 20	8
110		2		9
140		3		10
Глинистые грунты				
80	–	16	–	52
110	–	18	–	56
140	–	20	–	59

При наличии на месторождении грунтовых условий, хуже указанных в таблице 2 для обеспечения устойчивости буровой установки может быть рассмотрен вариант применения инженерной подготовки грунтового основания, заключающийся в замене верхнего слоя грунта, или вариант установки с заглублением в предварительно подготовленный котлован, а также обвалование камнем и других мероприятий.

Заключение

Авторами сформированы архитектурно-конструктивные и технические решения в отношении буровой установки для выполнения круглогодичного поисково-разведочного бурения в акваториях с коротким безледовым сезоном или неполным очищением ото льда. Выбранные габаритные размеры позволяют обеспечить устойчивость как самостоятельно устанавливаемой стальной водоизмещающей платформы, так и комплекса стальной буровой установки с подставкой при воздействии ледовых нагрузок, соответствующих круглогодичной эксплуатации при расчетных минимально допустимых характеристиках грунта. Определен общий подход к выбору минимально допустимых характеристик грунтового основания с учетом воздействия экстремальных внешних нагрузок для обеспечения устойчивости

комбинированной буровой установки в диапазоне глубин от 8 до 60 м.

Предложенная авторами в работе концепция погружной комбинированной буровой установки для круглогодичного поисково-разведочного бурения в условиях Арктики является перспективной для реализации. Данная концепция содержит апробированные решения в части стальной платформы, позволяющей самостоятельно производить буровые работы на глубинах моря от 8-10 до 25-30 м. Железобетонная подставка позволяет увеличить диапазон глубин до 60 м. Представленная в работе буровая установка является мобильным техническим средством, что подтверждается возможностью оперативной ее перестановки на новое место эксплуатации и это качество имеет особую актуальность в условиях Арктики.

В рамках межведомственной рабочей группы под совместным кураторством Минэнерго и Минвостокразвития России данная концепция комбинированной буровой установки была определена как одна из наиболее экономически эффективных и технически осуществимых.

Результаты работы могут быть применены в области технологий морского бурения при создании технических средств для поисково-разведочного бурения в условиях Арктики.

Литература

1. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, Указ № 642 01.12.2016 г.
2. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г., Указ № 645 от 26.10.2020 г.
3. Патент 2 745 457 Российская Федерация, МПК Е 02/1700. Морское гравитационное сооружение для арктических условий / Н.В. Амосова, И.Л. Благовидова, Коныгин А.Е., В.Ф. Ленский, А.В. Пьянов / заявитель

- и патентообладатель Акционерное общество «Центральное конструкторское бюро «Коралл» – № 2020127130, заявл. 12.08.2020. опубл. 25.03.2021, Бюл. № 9.
4. Амосова Н.В., Погружная комбинированная буровая установка для круглогодичного бурения в арктических условиях / Н.В. Амосова, И.Л. Благовидова, О.А. Иванова, Н.С. Иванова, А.В. Пьянов, А.С. Тертышникова // Судостроение. Номер: 4 (857), – СПб.: Изд-во АО «ЦТСС», 2021. – С. 29–33.
 5. Митрофанов И.Б., Особенности взаимодействия ледовых образований с ледостойкими сооружениями, предназначенными для освоения месторождения Каменномыское-море / И.Б. Митрофанов, А.М. Карпов, Е.Б. Карулин, И.Л. Благовидова, А.С. Тертышникова // Науч.-технич. журнал Проектирование и разработка нефтегазовых месторождений. 2018. № 1. С. 3-9.
 6. Ленский В.Ф., Перспективные концепции технических средств для освоения глубоководных акваторий арктических морей / В.Ф. Ленский, А.Г. Махмутов, М.В. Ковалев, И.Л. Благовидова, А.С. Тертышникова // RAO/CIS Offshore 2017: Труды. – СПб.: Химиздат, 2013. с. 153.
 7. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. НД № 2-020101-152. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2022. – 337 с.
 8. СП 38.13330.2018 «СНиП 2.06.04-82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)». М.: Минстрой России, с изм. 1 2022 г.
 9. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений: учеб. для гидротехн. спец. вузов. – М.: Высшая школа, 1985. – 352 с., ил.
 10. Жданев О.В., Фролов К.Н., Кобыгин А.Е., Гехаев М.Р. Разведочное бурение на арктическом и дальневосточном шельфе России // Арктика: экология и экономика. – 2020. – № 3 (39) – С. 112–125. – DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-112-125.
 11. «Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ». Российский морской регистр судоходства, 2018.
 12. ISO 19906 Petroleum and natural gas industries. Arctic offshore structure. International Organization for Standardization. 2019.
 13. СП.22.13330.2016 «СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений» (Приказ Минстроя России от 16 декабря 2016 г. № 970/пр).
 14. СП 23.13330.2011 «Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85».

References

1. Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii [Strategy of scientific and technological development of the Russian Federation]. Ukaz № 642 01.12.2016 g.
2. Strategiya razvitiya Arkticheskoy zony Rossiyskoy federatsii i obespecheniya natsional'noy bezopasnosti na period do 2035 g. [Strategy for the development of the Arctic Zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035]. Ukaz № 645 ot 26.10.2020 g.
3. Patent 2 745 457 Rossiyskaya Federatsiya, MPK E 02/1700. Amosova, N.V., Blagovidova, I.L., Konygin A.E., Lenskiy, V.F., P'yanov, A.V. Morskoe gravitatsionnoe sooruzhenie dlya arkticheskikh usloviy [Marine gravity facility for Arctic conditions]. Zayavitel' i patentoobladatel' Aktsionernoe obshchestvo «Tsentral'noe konstruktorskoe byuro «Korall» – № 2020127130, zayavl. 12.08.2020. opubl. 25.03.2021, Byul. № 9.
4. Amosova, N.V., Blagovidova, I.L., Ivanova, O.A., Ivanova, N.S., P'yanov, A.V., Tertyshnikova, A.S. Pogruzhnaya kombinirovannaya burovaya ustanovka dlya kruglogodichnogo bureniya v arkticheskikh usloviyakh [Submersible combined drilling rig for year-round drilling in Arctic conditions]. Nomer: 4 (857), – S.Pb.: Izd-vo AO «TsTSS», 2021. – S. 29–33.
5. Mitrofanov, I.B., Karpov, A.M., Karulin, E.B., Blagovidova, I.L., Tertyshnikova, A.S. Osobennosti vzaimodeystviya ledovykh obrazovaniy s ledostoykimi sooruzheniyami, prednaznachennymi dlya osvoeniya mestorozhdeniya Kamennomyskoye-more [Features of the interaction of ice formations with ice-resistant structures intended for the development of the Kamennomyskoye-Sea]. Nauch.-tekhnich. zhurnal Proektirovaniye i razrabotka neftegazovykh mestorozhdeniy. 2018. № 1. S. 3-9.
6. Lenskiy V.F., A.G. Makhmutoy, M.V. Kovalev, I.L. Blagovidova, Tertyshnikova, A.S. Perspektivnye kontseptsii tekhnicheskikh sredstv dlya osvoeniya glubokovodnykh akvatoriy arkticheskikh morey [Promising concepts of technical means for the development of deep-water areas of the Arctic seas]. RAO/CIS Offshore 2017: Trudy. – SPb.: Khimizdat, 2013. s. 153.
7. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Chast' II. Korpus [Rules of classification and construction of sea vessels. Part II. Hull]. ND № 2-020101-152. – SPb. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, 2022. 337 s.
8. SP 38.13330.2018 «СНиП 2.06.04-82*. Nagruzki i vozdeystviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya (volnovye, ledovye i ot sudov) [Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and from ships)]. М.: Минстрой России, с изм. 1 2022.
9. Ivanov P.L. Grunty i osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Soils and foundations of hydraulic structures]. Ucheb. dlya gidrotekhn. spets. vuzov. – М.: Vysshaya shkola, 1985. – 352 s., il.
10. Zhdaneev O.V., Frolov K.N., Konygin A.E., Gekhaev, M.R. Razvedochnoe burenie na arkticheskoy i dal'nevostochnoy shel'fe Rossii [Exploratory drilling on the Arctic and Far Eastern shelf of Russia]. Arktika: ekologiya i ekonomika. – 2020. – № 3 (39) – S. 112–125. – DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-112-125.
11. «Pravila klassifikatsii, postroyki i oborudovaniya plavuchikh burovykh ustanovok i morskikh statsionarnykh platform» [Rules for classification, construction and equipment of floating drilling rigs and offshore stationary platforms]. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, 2018.

12. «ISO 19906 Petroleum and natural gas industries. Arctic offshore structure. International Organization for Standardization. 2019.
13. SP.22.13330.2016 «СНиП 2.02.01-83*. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy» [Foundations of buildings and structures]. Priказ Ministroya Rossii ot 16 dekabrya 2016 g. № 970/pr.
14. SP 23.13330.2011 «Osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy» [Foundations of hydraulic structures]. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.02-85».

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

Ирина Львовна Благовидова, заместитель начальника отдела АО «ЦКБ «Коралл», 299045, г. Севастополь, ул. Репина, 1; доцент кафедры «Океанотехника и кораблестроение», Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: blagovidova@yandex.ru

Irina L. Blagovidova, Deputy Manager of General Engineering, Central Design Bureau "Corall" JSC, Repina, 1, Sevastopol, 299045, Russian Federation; assistant professor of the Department of Ocean engineering and shipbuilding, Sevastopol State University, Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: blagovidova@yandex.ru

Ольга Александровна Иванова, кандидат технических наук, инженер-конструктор 1-й категории, АО «ЦКБ «Коралл», 299045, г. Севастополь, ул. Репина, 1; доцент кафедры «Океанотехника и кораблестроение», Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: o.a.ivanova.kmt@mail.ru

Olga A. Ivanova, Ph.D. (Eng), design engineer of 1st category, Central Design Bureau "Corall" JSC, Repina, 1, Sevastopol, 299045, Russian Federation; assistant professor of the Department of Ocean engineering and shipbuilding, Sevastopol State University, Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: o.a.ivanova.kmt@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.06.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 21.07.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 23.08.2022.

Научная статья

УДК 629.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.039>

Проблемы ледовой регламентации не «эталонных» конструкций

Э.А. Кузнецов¹ kuznetcov.eal@students.dvfu.ru, В.А. Кулеш¹ vkulesh@mail.ru,О.Э. Суrow¹ surov.oye@dvfu.ru, Х.Ч. Фам¹ fam.chu@dvfu.ru¹Дальневосточный федеральный университет

Аннотация. Существующему регламенту российских ледовых классов и усиления судов почти 25 лет. При его разработке приоритетное внимание уделялось арктическим транспортным судам и ледоколам. Специфика судов других типов, например промысловых, практически не учитывалась. При формальном проектировании новых судов с «эталонными» конструктивными решениями этот регламент сохранял работоспособность и редко выявлял недостатки. Наиболее остро такие недостатки проявлялись в случаях применения регламента к судам иностранной и советской постройки. Несмотря на систематические изменения и дополнения Правил проблемы сохраняются. В работе рассмотрены существующие проблемы регламентации ледовых усиления судов. Показано, что регламентируемые параметры нагрузок, мощности, форштевней, рамного и основного набора, а также наружной обшивки могут приводить к неоправданному завышению требований. Предложены перспективные решения ледовых усиления с «компактным» рамным набором и наружными усилениями. Намечены пути развития прямых расчетов ледовой прочности.

Ключевые слова: ледовые нагрузки, «эталонные» конструкции, «компактный» набор, ледовые усиления, промысловые суда.

Для цитирования: Кузнецов Э.А., Кулеш В.А., Суrow О.Э., Фам Ч.Х. Проблемы ледовой регламентации «не эталонных» конструкций, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 3, С. 23—29. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.039

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.039>

Problems of ice regulation of non-«standard» structures

Eduard A. Kuznetsov¹ kuznetcov.eal@students.dvfu.ru, Victor A. Kulesh¹ vkulesh@mail.ru,Oleg E. Surov¹ surov.oye@dvfu.ru, Hiep C. Pham¹ fam.chu@dvfu.ru¹Far Eastern Federal University

Abstract. The regulations for Russian ice classes and ship reinforcements have been in place for almost 25 years. During its development, priority to Arctic transport vessels and icebreakers was given. The specifics of other types of vessels, for example, commercial ones, were practically not taken into account. During the formal design of new vessels with "standard" design construction, this regulation remained operational and rarely inconsistencies revealed. Such inconsistencies in cases of application of the regulations to foreign and Soviet built vessels were most acutely manifested. Despite systematic changes and additions to the Rules, problems persist. In the paper, the existing problems of regulation of ice reinforcements of ships are considered. The regulated parameters of loads, power, stem, ordinary frame and web frame, shell expansion to unjustified overstatement of requirements can cause is shown. Promising solutions for ice belt with a "compact" web and external strengthening are proposed. The ways of development of direct calculations of ice strength are shown.

Keywords: ice loads, «reference» constructions, «compact» framing, ice hull strengthening, fishing vessels.

For citation: Eduard A. Kuznetsov, Victor A. Kulesh, Oleg E. Surov, Hiep C. Pham, Problems of ice regulation of "non-standard" structures, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 3, P. 23—29. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.039

1. Проблемы ледовой регламентации

Российская система классификации и ледовых усиления корпусов судов одна из ведущих в мире. В первой половине XX века она развивалась преимущественно эмпирически. Одной из первых систематизирующих работ является [1], где акад. Шиманским Ю.А. были предложены «условные измерители» оценки ледовых качеств судов. К концу 60-х годов большой толчок расчетным методам дала работа [2] и другие, где контактные давления льда связывались с его прочностью на смятие. К концу 70-х годов была предложена «гидродинамическая модель» (ГДМ) удара о лед [3], на основе которой разработана система регламентации связей,

работающих преимущественно в упругой стадии [4], и вошедшая в Правила Регистра СССР.

Развитие методов оценки прочности с учетом пластических деформаций [5] привело при сохранении ГДМ к пересмотру системы регламентации [6], изданию Регистром нормативно-методических материалов [7] и включению в Правила новой редакции [8]. Новая ледовая глава Правил не была лишена недостатков [9] и систематически редактировалась [10]. В частности, её методические основы использовались при ледовых сертификациях судов [11], но дискуссии об эпюре расчетной ледовой нагрузки продолжают.

Ключевую роль в регламентации усиления играют параметры нагрузок. Это интенсивность нагрузки (давления), высота и длина распределения. Данные

параметры связаны с водоизмещением, обводами и ледовыми классами. Важное влияние на них мощности учитывается в ограниченных случаях.

Суда мощностью менее 740 кВт (на гребных валах) лишены права на ледовый класс Ice2 и выше. Парадокс в том, что тысячи буксиров и рыболовных судов советских проектов (с аналогичным старым классом L3) и иностранных формально не соответствуют праву на «систематическую» работу во льдах, только «эпизодически». Попытка создания современного аналога советскому сейнеру РС-300 потребует более чем 3-кратного повышения мощности. Но это не отразится на параметрах ледовых нагрузок, как результат ледовая прочность судов будет низкой и не соответствующей мощности.

Для подавляющего большинства судов наиболее опасным (с позиции прочности) является сценарий контакта с кромкой канала при движении за ледоколом. Формы «острых» кромок каналов и схемы их смятия судами давно и широко известны [2], рис. 1. Очевидно и то, что эпюра ледовых нагрузок в зоне контакта близка к «пиковой». Несмотря на это исходная эпюра была принята с равномерным давлением по прямоугольной зоне распределения, а дискуссии о расчетной эпюре ледовой нагрузки продолжаются.

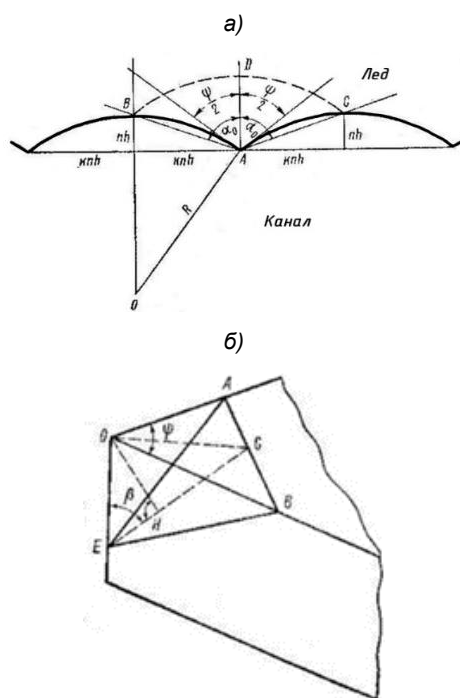


Рис. 1. Параметры кромки канала во льдах (а) и схема смятия (б) из работы [2]

Проблема в том, что регламент ледовой прочности можно формально обеспечить и без эпюры нагрузки, но без неё нельзя выполнять прямые проверочные расчеты прочности.

Штевни являются важнейшими элементами конструкции для обеспечения ледовых качеств судов. Однако их регламент предельно упрощен в сравнении с рамным набором. Для момента сопротивления это

$$W = 1,16 \eta p b. \quad (1)$$

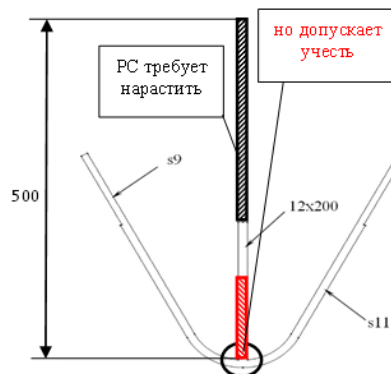


Рис. 2. Сечение форштевня и регламент

Здесь нет учета таких важных параметров как пролет и длина распределения нагрузки, но зато есть дополнительные условия «эталонных» решений типа высоты листа в диаметральной плоскости (ДП) или присоединения к сечению участков связей не более их 10 толщин. Противоречия иллюстрируются на примере форштевня японского судна, рис. 2. Для соответствия даже самому низкому классу Ice1 регламент требует увеличить высоту листа в ДП с 200 до 500 мм. При этом для оценки фактических параметров сечения допускает учитывать не 500 и даже не 200, а только 120 мм высоты листа. В условиях, когда прямые расчеты ледовой прочности не предусмотрены, модернизация (в крайне стесненных условиях узкого форпика) формально неизбежна. Регламент фактической площади сечения форштевня начинается от значения 40 см². При данной конфигурации сечения условие соответствия потребует толщин от 14 мм и выше, что нереально для небольших судов.

Регламентация рамных шпангоутов более детальная, включает требования к площади сечения стенок и моменту сопротивления с учетом числа несущих стрингеров в виде

$$A = 8,7 p a b k_p^H / R_{eH} \cdot (1 + m \cdot G) + 0,1 h_p \Delta s, \quad (2)$$

$$W = 250 k_p / R_{eH} \cdot k_p^H p a b l_p (1 - 0,5 b / l_p + k_m G) \cdot \omega_p. \quad (3)$$

Здесь следующее противоречие – рост числа стрингеров ведет к увеличению требуемых размеров рамных шпангоутов (см. табл. 1).

Таблица 1
Зависимость коэффициента k_m от числа стрингеров

число стрингеров	m	1	2	3	4	5	6
коэффициент	k_m	1,0	1,33	2,0	2,4	3,0	3,43

Противоречие выявлено в процессе переклассификации японского судна с перекрытием размерами 8×8,8 м и шпацией 0,55 м, включавшим 3 рамных шпангоута и 3 несущих стрингера. Результаты расчетов отражены в табл. 2 и подтверждают проблему.

Таблица 2
Результаты расчетов параметров рамных шпангоутов

Число стрингеров - m	A, см ²	W, см ³
1	18,7	1531
2	28,8	2227
3	34,2	2960
4	40,6	4080

Регламентация балок основного набора также не лишена недостатков. Она включает случаи, когда граница ледового пояса проходит на уровнях менее половины высоты перекрытий. Противоречие выявлено при разработке норм износа для советского рефрижератора проекта 1351 (серия «Татарстан») с солидным ледовым классом L1, соответствующим Arc4. Нормы износов обычно связывают с действующими Правилами. В результате расчетов по Правилам было установлено, что нижние бортовые перекрытия (в трюмах) соответствуют требованиям с запасом, а верхние (в твиндеках) имеют дефицит в 1,4 раза. Это вызывало необходимость чрезмерного ужесточения норм износа бортового набора в твиндеке, между 2-ой и верхней палубами.

Ситуация требовала проверки правомерности ужесточения норм путем прямых расчетов прочности методом конечных элементов (МКЭ). Пиковая по форме ледовая нагрузка с регламентируемыми параметрами смещалась на разные уровни по высоте борта. Расчеты показали качественно иной результат (рис. 3) – прочность борта твиндека, наоборот в 2,5 раза выше, чем в трюме.

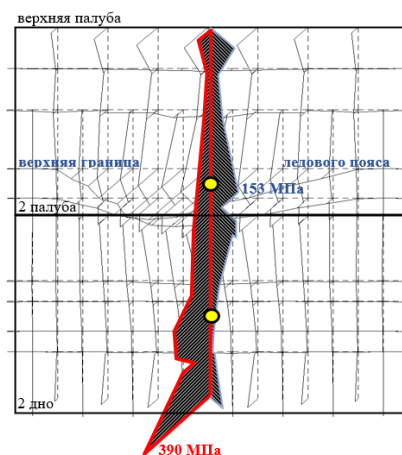


Рис. 3. Прямые МКЭ-расчеты ледовой прочности борта т/х «Татарстан»

Не лишена недостатков и регламентация толщин обшивки ледового пояса. Формулы Правил без поправки на коррозионный износ имеют вид:

при поперечной системе набора

$$s_{\text{но}} = 15,8a\sqrt{p/R_{\text{ен}}}/(1 + 0,5a/b). \quad (4)$$

при продольной системе набора

$$s_{\text{но}} = 15,8a\sqrt{p/R_{\text{ен}}}/(1 + 0,5a/l). \quad (5)$$

В первом случае формула (4) настроена на «эталонное» решение, когда высота распределения нагрузки (b) существенно меньше большего размера пластин в плане. Если проектные решения приближать к «клетчатой» системе набора, то регламент этого не учтет, а требование будет чрезмерно завышенным.

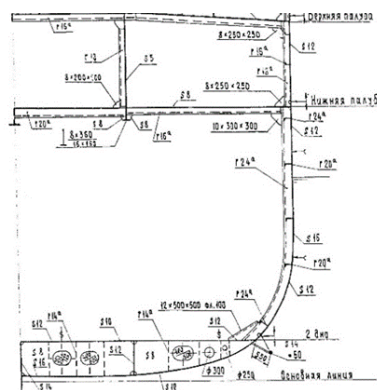
Во втором случае (5) высота распределения нагрузки вообще не влияет. Формально это соответствует «эталонному» решению, когда она больше размера продольной шпации (a). Но для не очень крупных судов и низких классов такое не

характерно. В результате и здесь требование будет также чрезмерно завышенным.

2. Решения с «компактным» набором

Правила допускают 2 «эталонные» системы набора бортов – монотонную (без рамного набора) и с рамным набором. При этом оговорено, что балки рамного набора должны быть выше основного набора не менее, чем в 2 раза. Для промысловых судов монотонная система предпочтительна из-за меньшего объема изоляции рефрижераторных помещений. Это преимущество широко использовалось в проектах как советских, так и иностранных судов. На рис.4а показано конструктивное решение в трюме большого автономного морозильного траулера (БАТМ) проекта 1288. Судно класса L2, соответствующего Ice3. Здесь основные и промежуточные шпангоуты (далее – шп) из п/бульбов 24а связаны 5-ю разносящими стрингерами из п/б 20а.

а)



б)

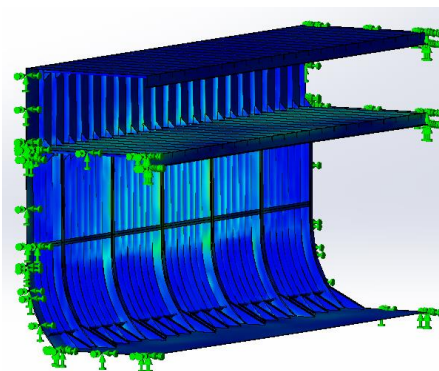


Рис. 4. Конструкция борта БАТМ проекта 1288 (а) и МКЭ-модель с рамным набором (б)

Расчеты при монотонной системе по формулам Правил показали, что советское решение имеет огромный дефицит прочности (в 2,7 раза), а соответствие достигается лишь при замене шпангоутов на голландский полособульб 370×13. В этом случае объем трюма, занятый набором, увеличится в 1,5 раза, а вес набора вырастет в 1,8 раза. Причина в явной недооценке Правилами роли разносящих стрингеров.

Дополнительно были рассмотрены 2 решения с «высоким» и «компактным» рамным набором (рис. 4б). Последнее также давно известно в мировой

практике промыслового судостроения. Для «компактного» рамного набора применен тавр 14×240/16×200 – высота стенки равна высоте шпангоутов. Результаты прямых расчетов прочности МКЭ и сравнения показали, что при «компактном» проектно-решении уровень напряжений в основных шпангоутах вырос с 111 до 133 МПа (в 1,2 раза), но снизился в стрингере со 115 до 77 МПа (в 1,5 раза) и в рамном шпангоуте – с 200 до 122 МПа (в 1,6 раза).

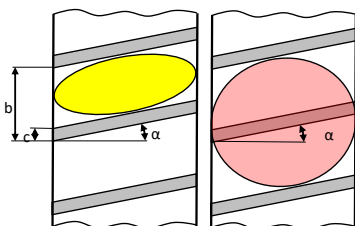
Таким образом, «компактные» проектные решения, формально не предусмотренные Правилами, могут быть более предпочтительны и эффективны в сравнении с «эталонными» решениями. Однако, для их реализации в проектах нужно отступить от формальной регламентации в пользу прямых расчетов ледовой прочности. Такой путь позволит не только вернуться к полезным советским и иностранным решениям «прошлого», но и открыть новые возможности для «будущего» конкурентного отечественного судостроения.

3. Решения с наружными усилениями

В мировой практике, особенно в Азиатско-Тихоокеанском Регионе (АТР), всё большее распространение получают наружные ледовые усиления корпусов судов. Чаще они включают систему наружных приварных полос полукруглого сечения и ледорезный брус по форштевню. К достоинствам таких усилений относят высокую технологичность и ремонтпригодность, возможность повысить не только прочность, но и долговечность в условиях ледового износа. Правила [10] не учитывают эти усиления, так как формально отсутствует их регламент. При этом потребность в них существует, а методическое обеспечение развивается.

Например, в работе [12] показана эффективность таких усилений как при поперечной, так и продольной системах набора борта, рис. 5.

а)



б)

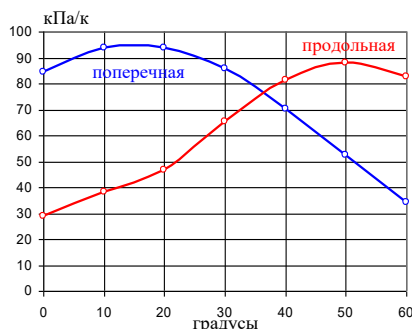


Рис. 5. Схемы возможных повреждений (а) и эффективность усиления наружными приварными полосами (б) из работы [12]

Пример проекта наружных ледовых усилений (2021 года) судна японской постройки для российских условий, соответствующих классу Ice2, представлен на рис. 6. Данное судно уже с постройки имело 4 наружные полосы (обозначение – 0) полукруглого сечения $R=37,5 \times 75$ мм. Положение этих полос ниже уровня балластной ватерлинии указывает на то, что они предназначены для защиты наружной обшивки от действия якорей и якорных цепей, т.к. судно не имело каких-либо ледовых усилений.

Дополнительные усиления включали ледорезный брус прямоугольного сечения 30×80 мм по форштевню (обозначение – 1) в районе переменных ватерлиний с заострением носовой грани. Существующие полосы продлены и приварены к бусу (обозначение – 2). В нос от 99 шп система набора продольная и шпангоуты отсутствуют. Здесь наружные полосы полукруглого сечения $R=37,5 \times 75$ мм (обозначение – 3) расположены под углом к горизонту 45° . В районе 84-99 шп с поперечной системой дополнительные наружные полосы полукруглого сечения $R=37,5 \times 75$ мм (обозначение – 4) расположены горизонтально, как и существующие. В корму от 84 шп дополнительные наружные полосы полукруглого меньшего сечения $R=30 \times 60$ мм (обозначение – 5) расположены с интервалом 350 мм. Усиления перекрывают носовой район судна.

Данный тип усиления не является новым и для российской практики. Впервые он был реализован во Владивостоке в 2008 году на небольшом танкере также японской постройки по проекту сотрудников ДВФУ. Во всех случаях усиления согласовывались с Регистром, однако отсутствие регламента таких усиления в Правилах не позволяет учитывать эти усиления при решении вопроса о символе ледового класса. При этом вопрос об эффективности подобных усиления и безопасности работы судов во льдах актуален для владельцев. В условиях отсутствия регламента решение такой задачи возможно лишь на основе прямых расчетов ледовой прочности. Результаты решения для рассмотренного судна с постройки и после его усиления представлены на рис. 7 в виде диаграмм безопасных скоростей для капитана. Здесь видно, что безопасные скорости движения во льдах после усиления увеличиваются в 3-4 раза при разных условиях загрузки судна. К сожалению, в данном случае реализовать усиления не удалось по причине кратких сроков докового освидетельствования, в условиях которых завод не успел получить заказ необходимого стального проката. Усиление было смещено владельцем на ближайшее очередное освидетельствование судна.

Заключение

Несмотря на изменения система регламентации ледовых усиления судов сохраняет ряд недостатков, показанных в работе. Они относятся к широкому кругу вопросов и могут завышать требования, понижая конкурентоспособность отечественных судов, в основном не связанных с арктическими классами. На примере промысловых судов показано, что старые решения с «компактным» набором, формально не допускаемые Правилами, могут быть эффективнее в сравнении с «эталонными». На примере перспективных решений с наружными

ледовыми усилениями, не учитываемых Правилами, также показана высокая эффективность.

Реализация в проектах не «эталонных» решений требует отхода от формальной регламентации в сторону прямых расчетов ледовой прочности. Такой

путь должен быть обеспечен эпюрой расчетных ледовых нагрузок, что позволит не только вернуться к полезным советским и иностранным решениям «прошлого», но и открыть новые возможности для будущего отечественного судостроения.

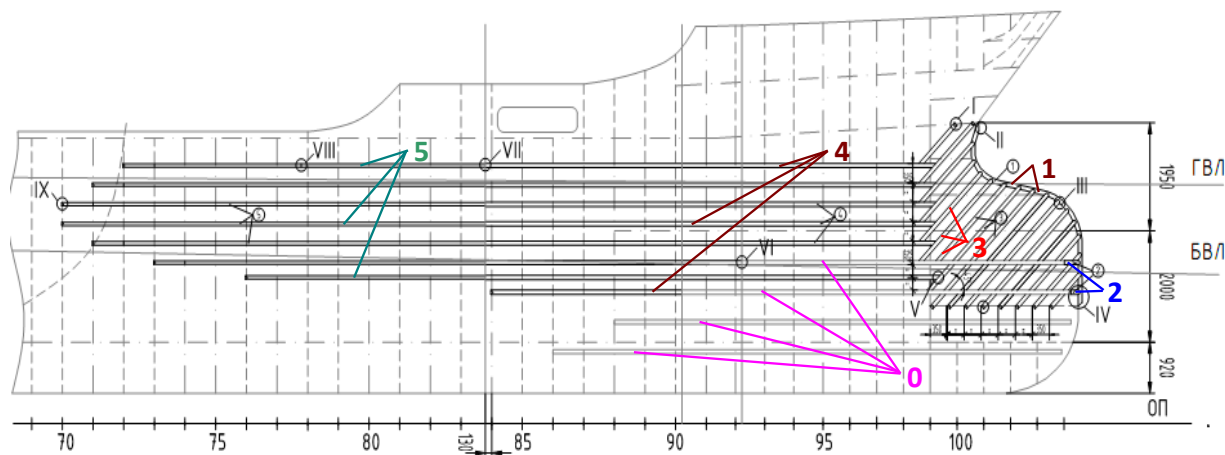


Рис. 6. Схема наружных ледовых усилений судна японской постройки

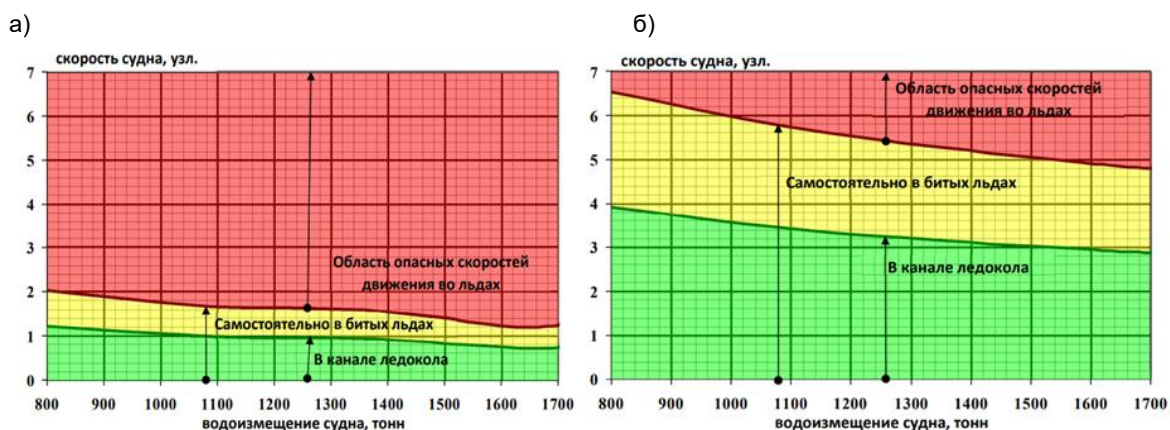


Рис. 7. Безопасные скорости движения судна во льдах в построечном варианте (а) и с учетом усиления (б)

Литература

1. Шиманский Ю.А. Условные измерители ледовых качеств судов // Труды ААНИИ, т.130, Ленинград, 1938.
2. Попов Ю.Н., Фадеев О.В., Хейсин Д.Е., Яковлев А.А. Прочность судов, плавающих во льдах // Судпромгиз, Ленинград, 1967, 223 с.
3. Курдюмов В.А., Хейсин Д.Е. Гидродинамическая модель удара твердого тела о лёд // Прикладная механика, ч. XII, вып. 10, 1976, с.103-109.
4. Курдюмов В.А., Трякин В.Н., Хейсин Д.Е. Определение ледовой нагрузки и оценка ледовой прочности корпусов транспортных судов // Труды ЛКИ, сборник «Ледопроеходимость и ледовая прочность судов», Ленинград, 1979, с.3-12.
5. Апполонов Е.М. Проектирование конструкций ледовых усиления по критерию предельной прочности // Судостроение, № 2, СПб., 1992, с.9-13.
6. Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Копилец Н.Ф., Дидковский А.В. О проекте новой редакции требований Правил Российского Морского Регистра Судоходства к ледовой прочности судов и ледоколов // Судостроение, № 5, СПб., 1997, с.17-23.
7. Проект новой редакции требований Правил Регистра к ледовым усилениям судов ледового плавания и ледоколов. Сборник нормативно-методических материалов, книга 7, СПб., 1998, с.171-229.
8. Евенко В.И., Кутейников М.А., Дидковский А.В., Апполонов Е.М. Новые требования Правил Регистра 1999 года издания к судам ледового плавания и ледоколам // Тезисы докладов конференции по строительной механике корабля памяти профессора П.Ф. Папковича, СПб., 2000, с.40-41.
9. Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Тимофеев О.Я. Обеспечение ледовой прочности и безопасности эксплуатации судов в российских арктических и замерзающих морях на основе комплексной системы формирования принципиальных инженерных решений // Труды ЦНИИ Крылова, вып. 39(323), СПб., 2008, с.69-89.

10. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства, СПб., издания с 1999 по 2023 годы.
11. Кулеш В.А., Каленчук С.В. Ледовая сертификация судов на условия арктических категорий // Морские интеллектуальные технологии, № 3(33), Т.1, СПб., 2016, с.54-59.
12. Кулеш В.А., Пец Н.Г. Эффективность наружных ледовых усилений с наклоном полос // Морские интеллектуальные технологии, № 1, т.2, СПб., 2020, с.71-81.

References

1. SHimanskij YU.A. Uslovnye izmeriteli ledovykh kachestv sudov // Trudy AANII, t.130, Leningrad, 1938.
2. Popov Yu.N., Fadeev O.V., Kheysin D.E., Yakovlev A.A. Prochnost' sudov, plavayushchikh vo l'dakh. [The strength of ships floating in ice]. Sudpromgiz, Leningrad, 1967, 223 s.
3. Kurdyumov V.A., Hejsin D.E. Gidrodinamicheskaya model' udara tverdogo tela o lyod // Prikladnaya mekhanika, ch. XII, vyp. 10, 1976, s.103-109.
4. Kurdyumov V.A., Tryaskin V.N., Hejsin D.E. Opredelenie ledovoy nagruzki i ocenka ledovoy prochnosti korpusov transportnykh sudov // Trudy LKI, sbornik «Ledoprohodimost' i ledovaya prochnost' sudov», Leningrad, 1979, s.3-12.
5. Appolonov E.M. Proektirovanie konstrukcij ledovykh usilenij po kriteriyu predel'noj prochnosti // Sudostroenie, № 2, SPb., 1992, s.9-13.
6. Appolonov E.M., Nesterov A.B., Kopilec N.F., Didkovskij A.V. O proekte novoy redakcii trebovanij Pravil Rossijskogo Morskogo Registra Sudohodstva k ledovoy prochnosti sudov i ledokolov // Sudostroenie, № 5, SPb., 1997, s.17-23.
7. Proekt novoy redakcii trebovanij Pravil Registra k ledovym usileniyam sudov ledovogo plavaniya i ledokolov. Sbornik normativno-metodicheskikh materialov, kniga 7, SPb., 1998, s.171-229.
8. Evenko V.I., Kutejnikov M.A., Didkovskij A.V., Appolonov E.M. Novye trebovaniya Pravil Registra 1999 goda izdaniya k sudam ledovogo plavaniya i ledokolam // Tezisy dokladov konferencii po stroitel'noj mekhanike korablya pamyati professora P.F. Papkovicha, SPb., 2000, s.40-41.
9. Appolonov E.M., Nesterov A.B., Timofeev O.YA. Obespechenie ledovoy prochnosti i bezopasnosti ekspluatatsii sudov v rossijskikh arkticheskikh i zamerzayushchikh moryah na osnove kompleksnoj sistemy formirovaniya principial'nykh inzhenernykh reshenij // Trudy CNII Krylova, vyp. 39(323), SPb., 2008, s.69-89.
10. Pravila klassifikatsii i postrojki morskikh sudov. Rossijskij morskoy registr sudohodstva, SPb., izdaniya s 1999 po 2023 gody.
11. Kulesh V.A., Kalenchuk S.V. Ledovaya sertifikatsiya sudov na usloviya arkticheskikh kategorij // Morskie intellektual'nye tekhnologii, № 3(33), Т.1, SPb., 2016, s.54-59.
12. Kulesh V.A., Pets N.G. Effektivnost' naruzhnykh ledovykh usileniy s naklonom polos. [Efficiency of slanted external ice hull reinforcement]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, № 1, т.2, SPb., 2020, s.71-81.

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

Виктор Анатольевич Кулеш, доктор технических наук, профессор кафедры кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Владивосток, о. Русский, Кампус ДВФУ, корп. С, уровень 7, С 730, e-mail: vkulesh@mail.ru

Олег Эдуардович Суков, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет 690922, Владивосток, о. Русский, Кампус ДВФУ, корп. С, уровень 6, С 618, e-mail: surov.oye@dvfu.ru

Хиен Чунг Фам, аспирант кафедры кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Владивосток, о. Русский, Кампус ДВФУ, корп. С, уровень 7, С 721, e-mail: fam.chu@dvfu.ru

Victor A. Kulesh, Dr. Sci. (Eng), Professor, Naval architecture department, Far Eastern Federal University, 690922, Vladivostok, Russian Island, Campus, bldg. C, Level 7, C 730, e-mail: vkulesh@mail.ru

Oleg E. Surov, Ph.D. (Eng), Associate professor, Associate professor of Shipbuilding and ocean engineering department, Far Eastern Federal University, 690922, Vladivostok, Russian Island, Campus, bldg. C, Level 6, C 618, e-mail: surov.oe@dvfu.ru

Hiep C. Pham, postgraduate of Shipbuilding and ocean engineering department, Far Eastern Federal University, 690922, Vladivostok, Russian Island, Campus, bldg. C, Level 7, C 721, e-mail: fam.chu@dvfu.ru

Эдуард Александрович Кузнецов, магистрант кафедры кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Владивосток, о. Русский, Кампус ДВФУ, e-mail: kuznetcov.eal@students.dvfu.ru

Eduard A. Kuznetsov, graduate of Shipbuilding and ocean engineering department, Far Eastern Federal University, 690922, Vladivostok, Russian Island, Campus, e-mail: kuznetcov.eal@students.dvfu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.07.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.08.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 21.08.2022

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS

Научная статья

УДК 629.124

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.040>

Модернизация оборудования для буксировочных испытаний моделей судов ледового плавания в НГТУ

Н.В. Калинина¹ nvk5133@mail.ru, А.Е. Жуков¹ zhukov@nntu.ru, Н.В. Золотов¹ ship@nntu.ru

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

Аннотация. При прогнозировании ледовой ходкости судов целесообразно использовать модельный эксперимент, поскольку проведение натурных испытаний является сложным и дорогостоящим мероприятием и требует вывода судов из эксплуатации. Модельные испытания во льдах – это актуальный, проверенный и экономически эффективный инструмент, который используется для прогнозирования ледовой ходкости судов. За длительный срок эксплуатации опытового бассейна НГТУ измерительная аппаратура морально устарела и требовала модернизации. Для решения современных ледотехнических задач разработан новый измерительный комплекс опытового бассейна, который позволяет увеличить его экспериментальные возможности, повысить точность и достоверность исследований ледовой ходкости судов при сохранении накопленного многолетнего опыта. В данной работе описан существующий экспериментальный комплекс опытового бассейна с гравитационной буксировочной системой, приведены используемые модели льда для испытания моделей ледоколов и судов ледового плавания. Проводимые экспериментальные исследования на моделях позволяют прогнозировать ходкость ледоколов и судов ледового плавания на этапе проектирования.

Ключевые слова: Арктика, ледовая ходкость судов, ледовый опытовый бассейн, моделированный лед, экспериментальный комплекс, модернизация, буксировочная тележка.

Финансирование: представленные результаты получены по проекту РНФ № 22-19-00376 «Экспериментально-теоретическое исследование полуэмпирических моделей взаимодействия судов со льдом».

Для цитирования: Калинина Н.В., Жуков А.Е., Золотов Н.В. Модернизация оборудования для буксировочных испытаний моделей судов ледового плавания в НГТУ, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 3, С. 30—38. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.040

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.040>

Modernization of equipment for towing tests of models of ice navigation vessels at NNSTU

Nadezhda V. Kalinina¹ nvk5133@mail.ru, Alexander E. Zhukov¹ zhukov@nntu.ru,

Nikolai V. Zolotov¹ ship@nntu.ru

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

Abstract. When predicting the ice seaworthiness of ships, it is reasonable to conduct a model experiment since carrying out full-scale tests is a complex and expensive procedure that requires the temporary decommissioning of ships. Testing ship models in ice is an actual, proven, and cost-effective method used to predict ship performance in ice conditions. Over the long period of operation of the experimental pool at NNSTU, the measuring equipment became obsolete and required modernization. To solve modern ice engineering problems, a new testing complex of the experimental basin has been developed, which makes it possible to improve its experimental capabilities and increase the accuracy and reliability of studies of the ice seaworthiness of ships while preserving the accumulated long-term experience. This paper describes the existing testing complex of the experimental pool with a gravitational towing system. The ice models used for testing icebreakers and ice navigation vessel models are described. Experimental study of vessel models in the ice basin allows for predicting the ice seaworthiness of icebreakers and ice navigation ships at the design stage.

Keywords: Arctic, ice propulsion of ships, ice experimental basin, simulated ice, experimental complex, modernization, towing cart.

Financial Support: the presented results were obtained under the project of the Russian Science Foundation No. 22-19-00376 «Experimental and theoretical study of semi-empirical models of the interaction of ships with ice».

For citation: Nadezhda V. Kalinina, Alexander E. Zhukov, Nikolai V. Zolotov, Modernization of equipment for towing tests of models of ice navigation vessels at NNSTU, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 3, P. 30—38. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.040

Введение

Арктический регион очень богат полезными ископаемыми. Актуальной является транспортировки

нефти и газа с Арктического шельфа по Северному морскому пути в различных ледовых условиях. Возникает необходимость прогнозировать время выполнения рейсов, исследовать ледовую ходкость

судов в различных режимах движения при круглогодичной навигации.

При прогнозировании ледовой ходкости судов используют модельный эксперимент, поскольку проведение натурных испытаний является сложным и дорогостоящим мероприятием, требует вывод судов из эксплуатации. Модельные испытания во льдах - это проверенный и экономически эффективный инструмент, который используется для прогнозирования ледовой ходкости судов и нагрузок на морские сооружения при проектировании [1, 2, 6, 11].

Практически все страны, создающие морскую технику, предназначенную для работы в Арктике и замерзающих морях, проводят испытания проектируемых судов и сооружений в ледовых бассейнах мира [11].

Сложность при проведении модельного эксперимента заключается в создании таких условий, при которых полученные результаты можно было бы пересчитать на натурный объект.

1. Ледовый опытовый бассейн НГТУ

В НГТУ имеется открытый ледовый бассейн для проведения испытаний судов в ледовых условиях. Испытания моделей можно проводить при движении в чистой воде, в битом и сплошном льду. Размеры бассейна следующие: длина 15,6 м; ширина 1,60 м; глубина 0,85 м. Общий вид бассейна показан на рис. 1. На рис. 2 и 3 показан бассейн, наполненный моделированным льдом.

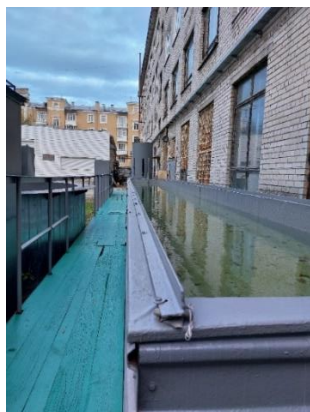


Рис. 1. Общий вид бассейна



Рис. 2. Бассейн с битым (моделированным) льдом в виде треугольных плиток полиэтилена



Рис. 3. Бассейн с битым (моделированным) льдом в виде гранул полиэтилена

Ледовый опытовый бассейн НГТУ (рис. 1) оборудован гравитационной буксировочной системой. Общая схема бассейна и гравитационной системы показаны на рис. 4.

Гравитационная система (рис. 4) на сегодняшний день представляет собой бесконечно замкнутый трос, натянутый на два ролика, которые установлены на торцевых стенках бассейна. Один из роликов выполнен за одно целое с барабаном меньшего диаметра чем ролик, на котором закреплен один конец веревки, которая наматывается на этот барабан, а другой конец веревки, на котором закреплена подвеска для размещения буксировочных гирь, перекинута через ролик, закрепленный в верхней части колодца. Другой ролик расположен на противоположном конце бассейна и устанавливается на подвижной опоре, к которой подвешен натяжной груз при помощи тросика, перекинутого через натяжной ролик. Скорость движения модели определяется фотоимпульсным способом - через отверстия в диске ведущего шкива буксировочной системы. Сигнал с фотодиода регистрируется частотомером. Сопротивление измеряется количеством разновесов через приводной барабан.

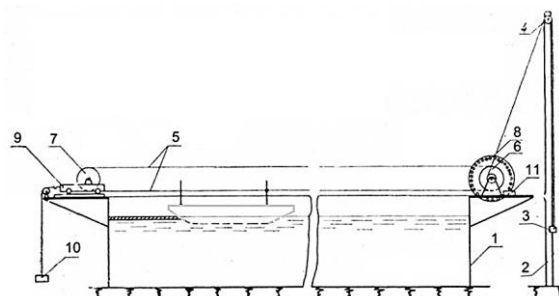


Рис. 4. Гравитационная буксировочная система:

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

Во время испытаний моделей в бассейне с гравитационной системой, буксируемая модель крепится определенным способом к бесконечному тросу и буксируется при помощи буксировочных гирь, проградуированных в Ньютонах. При достижении равномерного движения модели, сила сопротивления воды движению модели равна весу гирь P_H , установленных на подвеске и умноженных на

коэффициент равный отношению диаметров приводного барабана d_s и приводного ролика D_n :

$$R_m = P_n \frac{d_s}{D_n}, \text{ Н.} \quad (1)$$

Скорость буксировки модели v_m определяется при помощи диска с отверстиями, закрепленного на оси приводного барабана, оптронного датчика и частотомера. Если длина окружности приводного ролика приведена в соответствии с количеством отверстий в диске, то замеренная частота будет соответствовать скорости буксировки модели, в противном случае скорость модели равна:

$$v_m = \omega \cdot k = \omega \frac{\pi D}{n}, \text{ м/с,} \quad (2)$$

где ω – частота; k – коэффициент, определяемый по формуле $k = \frac{\pi D}{n}$; D – диаметр приводного колеса, м; n – число отверстий на оптронном диске.

Перед опытами проводится калибровка частотомера согласованием его показаний с низкочастотным генератором сигналов ГЗ-102. Датчики скорости градуируются на мерном участке длиной 5 м с помощью секундомера. Градуировка выполняется при постоянной скорости движения троса.

Модель битого льда представляет плитки из полиэтилена высокого давления необходимых толщин и размеров в плане. Эти испытания не требуют искусственного или естественного холода и могут проводиться в любое время года.

Условия подобию при моделировании в битом льду определяются зависимостями [3]:

$$\frac{L_n}{L_m} = \frac{B_n}{B_m} = \dots = \frac{h_n}{h_m} = \lambda; Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} = idem, \\ \rho_l / \rho_b = idem, S = idem, f = idem, \quad (3)$$

где L , B , h – длина, ширина судна, толщина льда натуре «н» и модели «м»; λ – масштаб модели судна; Fr – число Фруда; S – сплоченность льда; f – коэффициент трения льда об обшивку судна; v – скорость движения; g – ускорение свободного падения.

По данным [9] плотность однолетнего морского льда составляет $\rho_l = 0,86-0,92 \text{ т/м}^3$, коэффициент трения льда о сталь составляет $0,08 - 0,12$. У полиэтилена высокого давления по данными наших исследований плотность модели льда близка к $0,9 \text{ т/м}^3$. Коэффициент трения полиэтилена о корпус окрашенной модели составляет $0,11 \div 0,13$. Учитывая нестабильность физико-механических свойств натурного льда, зависящих от температуры, истории и времени намерзания, погодных условий можно считать условия (3) удовлетворительными для моделирования.

Большое разнообразие ледовых условий, нестабильность свойств и характеристик битых льдов делают достаточно сложным точно и определенно 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 подобию 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 $l/h = \text{const}$ и обеспечить повторяемость опытов.

Фото модели судна при движении в битом льду во время испытаний [4] приведены на рис. 5, 6.

Испытания в сплошном ледяном поле проводятся в холодное время года с использованием естественной наморозки льда. Одним из путей проведения испытаний ледоколов во льдах является использования в качестве модели льда естественный лед, намораживаемый в водоеме или в бассейне при отрицательных температурах воздуха [7].



Рис. 5. Модель судна пр. CNF22 при движении носом во льду сплоченностью 4 балла



Рис. 6. Модель судна пр. CNF22 при движении носом во льду сплоченностью 8 баллов

Естественный лед имеет при моделировании повышенную прочность по сравнению со строгой теорией моделирования, поэтому, очевидно, получило распространение о невозможности его использования. Однако, при использовании естественного льда компенсировать повышенную прочность 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 [5, 9, 10].

Масштаб пересчета толщин льда λ_h при моделировании:

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

Модуль пересчета сопротивления R при моделировании по Фруду

$$R_n = \lambda^3 R_m. \quad (5)$$

Скорость движения ледокола:

$$v_n = v_m \sqrt{\lambda}. \quad (6)$$

При пересчете сопротивления разрушения льда возникает масштабный эффект связанный с неучетом при моделировании смятия и дробления

кромки в местах контакта. Однако есть основание полагать, что этот эффект невелик.

Равенство коэффициентов трения $f_H = f_M$ корпуса судна и модели о естественный и моделируемый лед можно обеспечить специальным покрытием модели.

Чтобы избежать масштабного эффекта, связанного с несоответствием толщины льда и составляющей сопротивления обломков R_0 необходимо экспериментальное разделение составляющих сопротивления (аналогично разделением сопротивления трения и остаточного при экспериментальном определении сопротивления воды).

Для этого, кроме испытаний в сплошном льду, проводятся испытания в десятибалльном битом льду различной толщины. Затем определяются зависимости сопротивления, связанные с разрушением льда $R_{pm}(v)$ для всего набора толщин

$$R_{pm}(v) = R_m(v) - R_{0m}(v) \text{ при } h = \text{const.} \quad (7)$$

Пересчет на натуру для составляющих R_p и R_0 ведется раздельно. При пересчете R_p используются формулы

$$R_{pn} = \lambda^3 R_{pm}; \quad h_n = h_m \lambda^{4/3} \lambda_E^{1/3}; \quad v_n = v_m \sqrt{\lambda}. \quad (8)$$

При пересчете составляющей обломков R_0 с помощью интерполяции выбираются зависимости с толщинами льда $h_m = h_n / \lambda$, которые пересчитываются по формулам

$$R_{0n} = \lambda^3 R_{0m}, \quad h_n = \lambda h_m, \quad v_n = v_m \sqrt{\lambda}. \quad (9)$$

Сопротивление воды R_B может быть выделено из R_0 и пересчитано традиционными способами, используя испытания модели судна в чистой воде.

Однако, как показали наши эксперименты [2], можно проводить испытания по упрощенной методике не разделяя составляющие. При этом определение пересчет можно вести по формулам:

$$R_n = \lambda^3 R_m, \quad h_n = h_m \lambda^{4/3} \lambda_E^{1/3}, \quad v_n = v_m \sqrt{\lambda}. \quad (10)$$

Несоответствие толщин $\frac{h_n}{h_m} \neq \lambda$ приведет к некоторому уменьшению статической составляющей, связанной с притапливанием льдин, которая не велика.

При заданной суммарной тяге винтов ледокола $P_e = f(v)$ диаграмма ледопроеходимости $v = f(h)$ определяется совместным графическим решением уравнений

$$R = f(v, h); \quad P_e = f(v); \quad R = P_e. \quad (11)$$

Фрагменты испытаний ледокола в сплошном тонком льду приведены на рис. 7, 8, 9.



Рис. 7. Установка модели ледокола пр. 21900 перед движением



Рис. 8. Движение модели ледокола пр. 21900 в сплошном льду толщиной 2,0 мм



Рис. 9. Движение модели ледокола пр. 01105 в сплошном льду толщиной 4,1 мм

Недостатком буксировочной системы является ограниченность снимаемой информации во время исследований, а также возникает сложность в проведении испытаний моделей, оборудованных электроприводом (самоходные модели, модели на воздушной подушке).

2. Модернизация ледового опытового бассейна

Для проведения многофакторных исследований и обработки результатов испытаний в темпе эксперимента необходимо создание самоходной буксировочной тележки, отвечающей современным требованиям и задачам, решаемым в ледовом бассейне НГТУ.

Исходя из вышеперечисленных недостатков, ледовый опытовый бассейн нуждается в модернизации с целью повышения информативности и достоверности проводимых в бассейне исследований.

Модернизация опытного ледового бассейна запланирована в два этапа:

- разработка и создание самоходной буксировочной тележки, движущейся над бассейном по подвесным рельсовым путям;
- разработка и создание информационно-измерительного комплекса, состоящего из механических устройств, смонтированных на тележке с элементами автоматики и современной информационной измерительной системы, созданной на базе электронной платы SCXI-1540, системы беспроводного доступа и двух компьютеров с программным обеспечением, позволяющим вести сбор и обработку информации в темпе эксперимента.

Самоходная тележка (рис. 10) изготовлена и на ней установлен мотор-редуктора МЦ2У-100-112 (i-13,4)-13-Ц (спец 28 мм)-УЗ с двигателем постоянного тока П12М 0,44 кВт 1500 об/220 В и оборудование. Оборудование тележки представлено на рис. 11...20.

Учебно-исследовательский комплекс автоматизации ледового бассейна должен обеспечивать проведение испытаний в опытовом бассейне с использованием самоходной буксировочной тележки. Питание исследовательского комплекса осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В. Продолжительность съема информации от 1 до 10 секунд. Съем информации должен осуществляться как автоматически, от меток, установленных в начале и конце мерного участка бассейна, так и от ручного включения оператором. Информация в расшифрованном виде выводится на монитор вычислительного устройства. Исследовательский комплекс совместим с датчиками: трансформаторными, реостатными и оптронными.



Рис. 10. Буксировочная тележка



Рис. 11. Градуировочное устройство



Рис. 12. Аналоговый датчик скорости и пройденного пути



Рис. 13. Детали привода малых скоростей



Рис. 14. Заднее ведущее колесо буксировочной тележки



Рис. 15. Диск светимпульсного измерения скорости



Рис. 16. Мотор – редуктор привода малых скоростей



Рис. 17. Формирователь сигнала цифровой скорости и автоматическое управление замком динамометра



Рис. 18. Пульт управления ВИ-6



Рис. 19. Динамометр

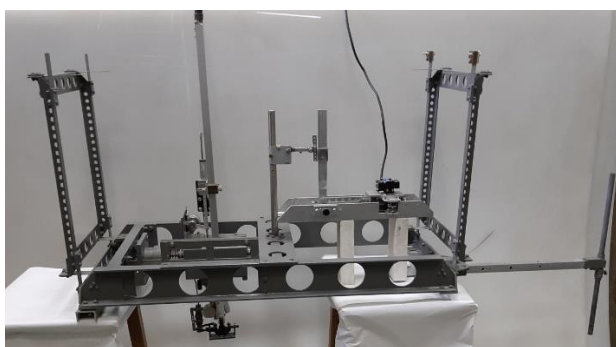


Рис. 20. Параллелограммная подвеска для измерения сил на модели и кинематических параметров (крена, дифферента, всплытия)

Исследовательский комплекс регистрирует следующие параметры:

- скорость буксировки модели $v = 0 \dots 1,0$ м/с;
- силу сопротивления $X = 0 \dots 100$ Н;
- дифферент модели не более $\varphi = \pm 5^\circ$;
- крен модели не более $\gamma = \pm 3^\circ$;
- высоту всплытия модели $h = 0 \dots 100$ мм.

Для измерения силы сопротивления воды движению модели судна на буксировочной тележке применяется специальный динамометр (рис. 19), выполненный в виде упругой прямоугольной рамочной пружины и оснащенный двумя типами датчиков: трансформаторным и индуктивным. Динамометр установлен на тележке и соединен с параллелограммной подвеской, закрепленной на буксировочной тележке при помощи горизонтальной тяги и рычага. Перемещая горизонтальную тягу по высоте рычага на динамометре и на вертикальной стойке параллелограммной подвески, можно менять пределы измерения силы сопротивления.

Всплытие, крен и дифферент определяются с помощью параллелограммной подвески (рис. 20). В середине горизонтальной рамы параллелограммной подвески имеется подвижная и подпружиненная в продольном направлении каретка, в которой установлен в вертикальном направлении телескопический нож. На нижнем конце ножа при помощи шарнира Гука закреплена площадка, к которой крепится модель. Эта площадка вместе с моделью обладает тремя степенями свободы: по высоте (всплытие), по углу дифферента и по углу крена. Замер дифферента, крена и всплытия осуществляется при помощи реостатных датчиков типа МУ614М – МУ615, соединенных системой рычагов с телескопическим ножом и площадкой для крепления модели (рис. 20).

В передней части параллелограммной рамы установлена направляющая штанга, удерживающая модель строго по курсу. В боковой части горизонтальной рамы параллелограммной подвески устроен автоматический электро-механический замок, запирающий динамометр в момент разгона и торможения буксировочной тележки. В момент разгона тележки с моделью параллелограммная рама и динамометр жестко фиксируются электро-механическим замком, который автоматически отключается в момент выхода на стабилизационный участок бассейна. В конце мерного участка бассейна динамометр автоматически запирается. Управление замком динамометра можно осуществлять вручную по желанию оператора с пульта управления. Погрешность измерений силы сопротивления зависит от настройки аппаратуры и определяется в момент градуировки по специальной сервисной программе на ПЭВМ. Перед началом испытаний также по программе проводится градуировка всплытия при помощи метрической линейки или штангенциркуля, дифферента и крена при помощи оптического квадранта.

Измерение скорости движения тележки осуществляется при помощи установленных на ее валу приводных колес, оптронного датчика, преобразователя сигналов частоты и модульной системы согласования сигналов SCXI 1000/1540 или частотомера следующим образом.

Сигнал с оптронного датчика поступает в систему SCXI 1000/1540 или частотомер. С системы SCXI 1000/1540 обработанный сигнал при помощи узла беспроводного доступа передается на дисплей в пультной.

На валу приводных колес установлена шестеренка к которой присоединен редуктор, увеличивающий обороты вала в 10 раз. На выходном валу редуктора размещен оптронный датчик, диск которого имеет 60 отверстий. Шаг отверстий на диске составляет 10 мм. Таким образом, шаг отверстий на диске соответствует перемещению тележки на расстояние 10 мм. Но за счет того, что диск датчика вращается в 10 раз быстрее, чем скорость ходовых колес, то частота импульсов, создаваемых диском оптронного датчика, будет соответствовать 1 мм перемещения буксировочной тележки. Таким образом, разрешающая способность датчика будет соответствовать скорости $\Delta v = 0,001 \text{ м/с}$ ($\Delta v = 1 \text{ мм/с}$).

Кроме частотных датчиков скорости на тележке имеется аналоговый датчик скорости, совмещенный с датчиком пройденного тележкой пути. Аналоговый датчик скорости представляет собой следующее устройство. С боку тележки установлен кронштейн. Один конец кронштейна закреплен при помощи оси на этом борту, а на другом конце кронштейна установлено колесо со шкивом. Это колесо со шкивом соединено при помощи пасика с генератором постоянного тока типа ДПР-42-Н1-03, который в свою очередь при помощи потенциометра и постоянного сопротивления соединен электрическим способом с микроамперметром.

Во время градуировки аналогового датчика скорости подбирается сопротивление потенциометра таким образом, чтобы скорость движения тележки соответствовала определенному показанию микроамперметра, установленного на пульте управления движением тележки. Как правило, данный способ контроля скорости имеет линейную зависимость постоянного напряжения от скорости движения тележки.

Привод малых скоростей [8] имеет свой датчик скорости, который представляет собой оптронный датчик, состоящий из рейки с отверстиями с шагом

10 мм, фотодиода и светодиода. Фотодиод и светодиод закреплены неподвижно на мотор-редукторе, через вращающуюся гайку которого проходит неподвижный винт, закрепленный на борту тележки. Привод малых скоростей работает следующим образом.

Мотор-редуктор устанавливается в одном из крайних положений неподвижного винта и жестко закрепляется на рельсе при помощи струбцин. При включении мотор-редуктора, который остается неподвижно закрепленным на рельсе, вращающаяся ведомая шестерня-гайка толкает неподвижно закрепленный ходовой винт вместе с тележкой. При этом мерная рейка с отверстиями перемещается вместе с тележкой относительно неподвижного оптронного датчика, создавая импульсные электрические колебания формирователя сигналов с частотой n прямо пропорционально скорости движения тележки v и обратно пропорционально шагу отверстий s :

$$n = \frac{v}{s}.$$

Скорость движения тележки будет определяться по формуле $v = ns$, мм/с.

Заключение

Ледовый опытовый бассейн активно используется в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры» и должен быть приспособлен для решения современных задач ледотехники.

Модернизация ледового опытового бассейна НГТУ и оборудование его самоходной буксировочной тележкой позволит осуществлять обработку результатов исследований в темпе эксперимента и увеличить экспериментальные возможности в области проведения модельных исследований, повысить точность и достоверность исследований по прогнозированию ледовой ходкости судов. Исследования, проведенные на моделях, позволяют прогнозировать ходкость ледоколов и судов ледового плавания на этапе проектирования.

Литература

1. Беляков В.Б. Экспериментальные исследования ледопроеходимости судов в новой модели льда // Проектирование средств продления навигации: Межвуз. сб. / Горьков. политехн. ин-т. - Горький, 1986. - с.79-84.
2. Беляков В.Б., Грамузов Е.М. Ледовый опытовый бассейн Горьковского политехнического института // Теория и прочность ледокольного корабля: Межвуз. сб. науч. тр. / Горьковский политехнический институт. - Горький, 1982. - С.20-22.
3. Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Куркин А.А. Физическое моделирование сопротивления сплошного льда движению судов // Экологические системы и приборы № 12. 2022. С 82 – 89.
4. Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Ларин А.Г., Ларина Е.М. Прогнозирование ходкости грузопассажирского парома при движении в битых льдах // Научные проблемы водного транспорта. Выпуск 73 (4), 2022 – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2022. С. 15-26.
5. Зуев В.А., Беляков В.Б., Грамузов Е.М. Опыт испытаний моделей судов в новом ледяном покрове // Экспериментальные методы исследования способов активного воздействия на мореходные качества судов: Тез. докл. XVII Всесоюзной науч.-техн. конф. по экспериментальной гидромеханике судов.– Л., 1984.- С.179-181.
6. Зуев В.А., Беляков В.Б., Грамузов Е.М. Способ испытания моделей судов ледового плавания / А.с. № 1071515 от 07.02.84. Опубл. 07.02.84, Бюл. № 5.
7. Зуев В.А., Грамузов Е.М. Новые подходы к моделированию ледовой среды при модельных испытаниях судов // Полярная механика. г. Владивосток, 2016.

8. Зуев В.А., Золотов Н.В. Привод малых скоростей для буксировочной тележки опытового гидробассейна. Патент на полезную модель № 179432 от 15.05.2018, НГТУ.
9. Ионов Б.П., Грамузов Е.Н. Ледовая ходкость судов: Монография. – СПб.: Судостроение, 2001. – 512 с.
10. Калинина Н.В. Экспериментально-теоретические исследования ледовой ходкости судов // Деловой журнал «Neftegaz.RU», № 11 (131) ноябрь 2022. С.56-62.
11. Сазонов К.Е. Модельный и натурный эксперименты в морской ледотехнике // Санкт-Петербург: Крыловский государственный научный центр, 2021.

References

1. Belyakov V.B. Eksperimental'nye issledovaniya ledoprokhodimosti sudov v novoy modeli l'da [Experimental studies of ship icebreaking in a new ice model]. Proektirovanie sredstv prodleniya navigatsii: Mezhvuz. sb., Gor'kov. politekhn. in-t, Gor'kiy, 1986. s.79...84.
2. Belyakov V.B., Gramuzov E.M. Ledovyy opytovyy basseyn Gor'kovskogo politekhnicheskogo instituta [Ice experimental basin of Gorky Polytechnic Institute]. Teoriya i prochnost' ledokol'nogo korablya: Mezhvuz. sb. nauch. tr. Gor'kovskiy politekhnicheskiiy institute, Gor'kiy, 1982. S.20...22.
3. Gramuzov E.M., Kalinina N.V., Kurkin A.A. Fizicheskoe modelirovanie soprotivleniya sploshnogo l'da dvizheniyu sudov [Physical modeling of solid ice resistance to ship movement]. Ekologicheskie sistemy i pribory № 12. 2022. S. 82 ... 89.
4. Gramuzov E.M., Kalinina N.V., Larin A.G., Larina E.M. Prognozirovaniye khodkosti gruzopassazhirskogo paroma pri dvizhenii v bitykh l'dakh [Forecasting the propulsion of a cargo-passenger ferry when moving in broken ice]. Nauchnye problemy vodnogo transporta. Vypusk 73 (4), 2022, N. Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2022. S. 15...26.
5. Gramuzov E.M., Kalinina N.V., Kurkin A.A. Fizicheskoe modelirovanie soprotivleniya sploshnogo l'da dvizheniyu sudov [Physical modeling of solid ice resistance to ship movement]. Ekologicheskie sistemy i pribory № 12. 2022. S 82 ... 89.
6. Zuev V.A., Belyakov V.B., Gramuzov E.M. Sposob ispytaniya modeley sudov ledovogo plavaniya [Method of testing models of ice navigation ships]. A.s. № 1071515 ot 07.02.84. Opubl. 07.02.84, Byul. № 5.
7. Zuev V.A., Gramuzov E.M. Novye podkhody k modelirovaniyu ledovoy sredy pri model'nykh ispytaniyakh sudov [New approaches to modeling the ice environment during model tests of ships]. Polyarnaya mekhanika. g. Vladivostok, 2016.
8. Zuev V.A., Zolotov N.V. Privod malykh skorostey dlya buksirovochnoy telezhki opytovogo gidrobasseyna [Low-speed drive for the towing trolley of the experimental hydrobasin]. Patent na poleznuyu model' № 179432 ot 15.05.2018, NGTU.
9. Ionov B.P., Gramuzov E.N. Ledovaya khodkost' sudov [Ice propulsion of ships]: Monografiya. SPb.: Sudostroenie, 2001. 512 s.
10. Kalinina N.V. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya ledovoy khodkosti sudov [Experimental and theoretical studies of the ice propulsion of ships]. Delovoy zhurnal «Neftegaz.RU», № 11 (131) noyabr' 2022. S.56...62.
11. 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.

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

Надежда Викторовна Калинина, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, 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, 603950, Russian Federation, e-mail: nvk5133@mail.ru

Александр Евгеньевич Жуков, 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@ntnu.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@ntnu.ru

Николай Владимирович Золотов, заведующий лабораторией кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: ship@nntu.ru

Nikolay V. Zolotov, Head of the Laboratory of the Department «Shipbuilding and Aviation Technology», Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603950, Nizhny Novgorod, Minina str., 24, e-mail: ship@nntu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.06.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 27.07.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 11.08.2023.

Научная статья

УДК 629.124

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.041>

Определение допустимой массы груза, выгружаемого с судна на кромку льда

Ю.А. Двойченко¹ edbas2@yandex.ru, В.Ф. Кулепов¹ kulepov@dpinntu.ru,
Е.В. Садекова¹ jane51268@rambler.ru, А.С. Себин¹ SebinAndrei@gmail.com

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

Аннотация. Современные нормативные документы не регламентируют ряд важных для практики вопросов, связанных с разгрузкой судов на лёд: изменение величины допустимой нагрузки с удалением от ледовой кромки, безопасная конфигурация нескольких грузов на льду, общая масса которых превышает допустимую для единичного груза. Использование в качестве критерия безопасности допускаемой величины нагрузки или допускаемого уровня напряжений не позволяет дать на них ответы. Это обстоятельство заставляет обратиться к другой характеристике – прогибу ледяного покрова. Тогда критерий может быть сформулирован следующим образом: безопасная нагрузка на ледяной покров связана с величиной допустимого прогиба, определенного на бесконечном ледяном поле. Этот прогиб является критическим и для любого другого случая приложения нагрузки к ледяному полю различной конфигурации. Таким образом, в качестве критерия безопасности может быть использован максимальный допустимый относительный прогиб льда. Эта гипотеза была сопоставлена с данными экспериментов и с теоретическими расчетами. Результаты подтверждают возможность использования предлагаемого критерия. Даны рекомендации по его практическому применению, в том числе при одновременном действии двух нагрузок. Наличие сквозных трещин во льду может его ослаблять, снижая допустимый уровень нагрузки по сравнению с регламентируемым. Поэтому при производстве грузовых операций на ледовой кромке требуется обустройство дополнительного усиления из деревянных брусков в месте приема груза на кромку.

Ключевые слова: разгрузка судна во льдах, безопасная величина груза, критерий безопасности, критический прогиб.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 22-19-00376 «Экспериментально-теоретическое исследование полужемпирических моделей взаимодействия судов со льдом».

Для цитирования: Двойченко Ю.А., Кулепов В.Ф., Садекова Е.В., Себин Ф.С. Определение допустимой массы груза, выгружаемого с судна на кромку льда, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 3, С. 39—44. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.041

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.041>

Determination of the permissible weight of cargo unloaded from the vessel to the ice edge

Yuri A. Dvoichenko¹ edbas2@yandex.ru, Viktor F. Kulepov¹ kulepov@dpinntu.ru,
Evgenia V. Sadekova¹ jane51268@rambler.ru, Andrei S. Sebin¹ SebinAndrei@gmail.com

¹Nizhny Novgorod State Technical University, n. a. R. E. Alekseev (NNSTU)

Abstract. Modern regulatory documents do not regulate some issues that are important for practice related to unloading ships on ice: changing the permissible weight with distance from the ice edge, the safe configuration of several loads on ice, the total weight of which exceeds the permissible for a single cargo. The use of the permissible load value or the permissible stress level as a safety criterion does not allow us to give answers to them. This fact makes us to turn to another characteristic – the bending of the ice sheet. Then the criterion can be formulated as follows: the safe weight on the ice cover is related to the value of allowable bending determined on an infinite ice field. This bending is also critical for any other case of applying a load to an ice field of various configurations. Thus, the maximum permissible relative bending of the ice can be used as a safety criterion. This hypothesis was compared with experimental data and with theoretical calculations. The results confirmed the possibility of using the proposed criterion. Recommendations are given on its practical application, including with the mutual action of two weights. The presence of through cracks in the ice can weaken it, reducing the permissible load level compared to the regulated one. Therefore, when carrying out cargo operations on the ice edge, it is necessary to arrange additional reinforcement from wooden beams at the place where the cargo is received on the edge.

Keywords: unloading a vessel in the ice, safe cargo weight, safety criteria, critical bending.

Financial Support: the work was supported by the RSF in the research project N 22-19-00376 "Experimental and theoretical investigation of semi-empirical models of the ships interaction with ice".

For citation: Yuri A. Dvoichenko, Viktor F. Kulepov, Evgenia V. Sadekova, Andrei S. Sebin. Determination of the permissible weight of cargo unloaded from the vessel to the ice edge, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 3, P. 39—44. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.041

Введение

Развитие Арктических промыслов углеводородов связано с выгрузкой техники и оборудования непосредственно на кромку у бортов ледокольного судна, с организацией безопасной перевозки и складирования грузов. Работа на ледяном покрове осложнена опасностью пролома льда и сопутствующей гибелью техники и людей.

Существующие рекомендации по безопасному поведению работ на ледяном покрове [1] относятся к одиночной нагрузке вдали от кромок льда. В некоторых рекомендациях также даны безопасные расстояния от груза до кромок в зависимости от массы груза [2]. Этого вполне достаточно на ледяной переправе, когда транспортные единицы движутся последовательно друг за другом и существует возможность прокладывать трассу вдали от кромок.

Разработанные рекомендации и нормативные материалы оставляют открытыми ряд важных для практики вопросов, главными из которых являются следующие:

- насколько безопасная величина нагрузка на кромке будет меньше безопасной величины нагрузки расположенной вдали от кромок;
- как зависит величина безопасной нагрузки от расстояния до кромок льда;
- на каком безопасном расстоянии могут располагаться относительно друг – друга две и более нагрузки, суммарная величина которых равна или больше предельного значения.

Особенности существующих методов и рекомендаций по определению безопасной нагрузки на ледяной покров

Инженерное решение проблемы безопасного использования ледяного покрова для перемещения по нему техники и людей впервые было получено в результате натурных опытов, проведенных в 1942 г на Ладожской «Дороге жизни» инженерами В. Ключаревым, и С. Изюмовым [3]. В баки, установленные на сплошном ледяном покрове, закачивалась вода вплоть до пролома льда. В последствии эти опыты послужили основой для разработки правил безопасной работы на ледяном покрове [1, 2] для практики гидротехнического строительства, транспортных операций на льду и пр.

При кратковременном воздействии одиночной нагрузки на «бесконечный» (т.е. достаточно далеко от кромок льда) ледяной покров в качестве критерия безопасности используется так называемая «допускаемая нагрузка», которая определяется формулой, предложенную М.М. Казанским и А.Р. Шульманом [2]

$$P_0 = \frac{B_n}{N} h_n^2 k_t S_n, \quad (1)$$

где P_0 – допускаемая нагрузка (в тоннах) транспортного средства на лед;

B_n – коэффициент, учитывающий сосредоточенность нагрузки ($B_n = 100$ для колесных грузов, $B_n = 125$ для гусеничных грузов массой до 18т); N – коэффициент запаса прочности и учета трещин, $N=1$ для единовременно действующей автотранспортной переправе,

h_n – толщина ледяного покрова, м;

k_t – коэффициент, учитывающий температуру льда, при $12^\circ > t > 0^\circ \text{C}$ $k_t=1$;

S_n – коэффициент, учитывающий соленость льда, для пресноводного льда $S_n = 1$, для свежееобразовавшегося морского льда Арктики; $S_n = 0,3$.

Критерий предельной нагрузки (1) нельзя использовать при наличии на льду многих (в наиболее простом случае – двух) нагрузок, которые находятся на произвольном расстоянии друг от друга, а также величину опасной нагрузки на кромке льда. В этом случае требуется иной критерий, отвечающий следующим основным требованиям: органическая связь с используемыми критериями «допускаемой нагрузки» типа применяемого в формуле (1) и возможность его использования для обеспечения безопасности на основе теоретического решения задачи о деформации ледяного покрова под нагрузкой.

Использование в качестве критерия допускаемого напряжения обусловлено тем, что внутренние напряжения могут быть рассчитаны теоретически и сравнены с их допускаемыми величинами, полученными исходя из опытов на образцах. Однако такой подход неприемлем по двум причинам.

Первая обусловлена тем, что точные решения математических моделей известного типа [4, 5], в случае сосредоточенного усилия, дают значения напряжения под силой $\sigma \rightarrow \infty$. Вторая связана с тем, что данные по прочности льда (на растяжения, сжатия, изгиб и т.д.) имеют большую нестабильность значений. Так, например, предел прочности льда на растяжение может меняться в четыре раза [5]. Однако, при этом отклонение результатов опытного определения $P_{пр}$ [7, 8] дает среднеквадратическое отклонение среднего от формулы (2) не более 10%.

Предлагаемый критерий предельной нагрузки

Такое обстоятельство заставляет обратиться к другой характеристике – прогибу ледяного покрова. Критерий безопасного нагружения ледяного покрова формулируется так:

Безопасная нагрузка на ледяной покров связана с величиной допустимого прогиба, определенного на бесконечном ледяном поле. Этот прогиб является критическим и для любого другого случая приложения нагрузки к ледяному полю иной конфигурации (полубесконечному, в форме клина).

Идея о том, что ледяной покров разрушается при одинаковом прогибе под силой независимо от его конфигурации в плане, была высказана В.И. Каштеляном. Эта гипотеза получила экспериментальное подтверждение в ледовом бассейне Арктического и Антарктического НИИ [9]. Было получено, что пролом происходит приблизительно при одном и том же прогибе независимо от конфигурации ледяного поля. Результаты опытов были сопоставлены с теоретическими зависимостями.

Величина теоретического прогиба под силой P для бесконечной пластинки w_{6n} [3]:

$$w_{6n} = 0,125 \frac{P}{\sqrt{\rho g D}}; \quad (2)$$

и полубесконечной w_{6n} [5], для которой (нагрузка на кромке):

$$w_{п.бп} = 0,478 \frac{P}{\sqrt{\rho g D}}, \quad (3)$$

где $D = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость пластины; E – модуль упругости льда (модуль Юнга); ν – коэффициент Пуассона; ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения.

При одной и той же нагрузке P прогиб (3) на кромке полубесконечной пластины будет больше, чем вдали от кромки (2):

$$w_{п.бп} / w_{бп} = 3,8 \quad (4)$$

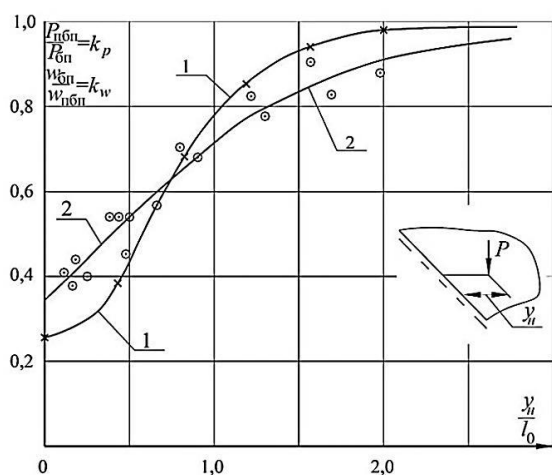


Рис. 1. Увеличение грузоподъемности полубесконечной пластины k_p и уменьшение относительного максимального прогиба k_w при удалении нагрузки от кромки льда; 1 – численный расчет прогибов, 2 – экспериментальные точки из работы [11]

Результаты экспериментов [7] показали, что проломные нагрузки для этих случаев $P_{п.бп}$ и $P_{бп}$ соотносятся, как $P_{бп} / P_{п.бп} \approx 2,8 \div 3,8$, т. е., опасная нагрузка на кромке в три – четыре раза меньше, чем в центральной части ледяной пластины. В работе [7] приведены результаты определения предельной нагрузки, разрушающей лед, при удалении точки ее приложения от кромки. Теоретический расчет прогибов для нагрузки, удаляющейся от кромки выполнен методом, изложенном в работе [12]. Результат сопоставления относительных прогибов и относительных разрушающих нагрузок показан на рис.1. Можно видеть, что экспериментальная кривая 2 по предельным нагрузкам достаточно близко проходит рядом с теоретической линией 1- критерия опасного прогиба. Это выражается следующим соотношением (используя близость кривых 1 и 2 на рис. 1):

$$\frac{w_{бп}}{w_{п.бп}} = k_w \approx k_p = \frac{P_{п.бп}}{P_{бп}}, \quad (5)$$

Практическое использование критерия предельного прогиба

Таким образом, зная теоретическое значение предельного прогиба льда для случая данного приложения безопасной одиночной нагрузки к бесконечному ледяному покрову, можно

приблизительно определить безопасную нагрузку для полубесконечного покрова. Численным значением коэффициента k_w , данным на рис.1 удобно пользоваться в табличной форме (табл.1).

Для пользования этой таблицей кроме допускаемой величины нагрузки вдали от кромки (по формуле (1)) необходимо знать величину l_0 (характерный линейный размер изгиба льда) определяется по формуле $l_0 = \sqrt[4]{D/\rho g}$, который для морского льда следует принимать $E = 3 \cdot 10^9$ Па.

Таблица 1

Коэффициент уменьшения нагрузки при приближении к кромке

Безразмерное расстояние от кромки y/l_0	Коэффициент уменьшения нагрузки k_w
0	0.26
0.25	0.29
0.50	0.45
0.75	0.64
1.0	0.74
1.25	0.88
1.5	0.93
1.75	0.96
2.0	0.98
2.5	0.99
3.0	1.00

Далее примем, что ледяной покров опасно нагружен, если в какой-либо точке возникает прогиб w_0 , определенный по формуле (5) при подстановке в нее предельной нагрузки P_0 , найденной по формуле (1).

$$w_0 = 0,125 \frac{P_0}{\sqrt{\rho g D}} \quad (6)$$

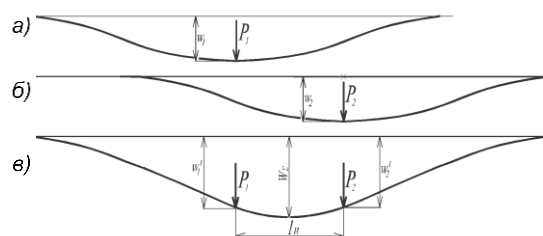


Рис. 2. Суммирование прогибов от двух одинаковых близко расположенных нагрузок P_1 и P_2 :

а) первая нагрузка; б) вторая нагрузка; (w_1, w_2 – максимальные прогибы при действии одиночных нагрузок); в) суммарный прогиб от действия двух нагрузок (w_1', w_2' – прогибы под силами при их совместном действии); W_c – суммарный максимальный прогиб ледяного покрова при действии двух нагрузок, l_n – расстояние между нагрузками.

Рассмотрим взаимное действие двух нагрузок на бесконечном ледяном покрове, каждая из которых меньше опасного значения. Прогиб ледяной пластины под действием одиночной нагрузки описывается решением Герца [3]:

$$w(r) = \frac{P}{8\sqrt{\rho h_n D}} \cdot \frac{4}{\pi} \int_0^\infty \frac{\xi J_0(r\xi) d\xi}{1 + \xi^4}, \quad (7)$$

где $J_0(r, \xi)$ – функция Бесселя; r – расстояние от точки приложения нагрузки.

При действии двух (и более) нагрузок прогибы, вычисленные по формуле (7) складываются. Картина отдельных прогибов и их сумма показана на рис. 3.

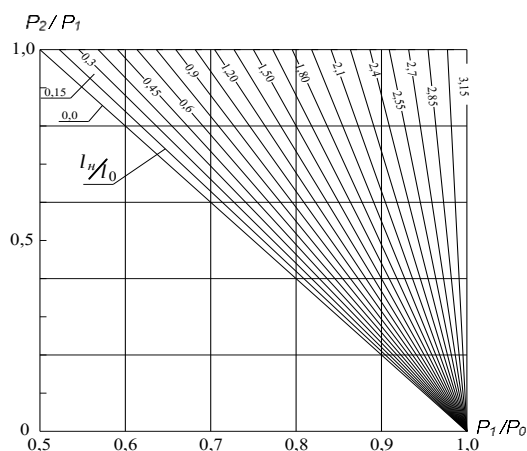


Рис. 3. Зависимость безопасных расстояний между двумя нагрузками от соотношения их величин: P_0 – безопасная нагрузка для данной толщины льда; P_1 – величина первой нагрузки $P_1 \leq P_0$; P_2 – величина второй нагрузки $P_2 \leq P_1$

Используя предположение о критерии опасного прогиба и выполняя расчет по формуле (6) и суммируя прогибы при различных расстояниях I_n между нагрузками, получаем в итоге диаграмму (рис.3) безопасных расстояний между нагрузками, каждая из которых меньше или равна предельно безопасной P_0 . Эти расстояния должны обеспечиваться, если трассы расположены параллельно, а также при последовательном движении транспортеров друг за другом.

Следует принимать во внимание, что нагружение кромки льда в действительности более опасно, чем следует из теории и поставленного эксперимента, показанных на рис. 1.

При возникновении сквозных трещин ледяной

покрыв вдали от кромок (бесконечное ледяное поле) сохраняет несущую способность благодаря «арочному эффекту», когда пролому препятствует взаимодействие берегов трещин [10,11].

Эффект распора ледяных клиньев наиболее выражен когда вблизи отсутствует свободная кромка. На свободной кромке или вблизи ее распорные усилия резко уменьшаются из-за отсутствия препятствий для выворачивания клиньев в сторону свободной воды. Кромка льда, образованная судном ледового плавания, как правило, пронизана множеством таких трещин. Пролом может произойти также по линии старых термических или других трещин, отсекающих место приложения нагрузки от остальной ледяной пластины.

Заключение

Следует оценивать максимально возможную безопасную нагрузку на кромке в соответствии с приведенными выше данными, однако следует помнить об особой опасности пролома под нагрузкой вблизи кромки.

Транспортные операции вблизи кромки ледяного покрова должны тщательно готовиться. Нельзя рассчитывать на прочность льда. Поэтому, то место на кромке, куда производится выгрузка, должно быть подкреплено системой брусьев. После этого на кромку следует опустить судовым краном нагрузку, масса которой должна быть в три раза меньше, чем получается по формуле (1). Если подкрепленная брусьями кромка выдерживает такую нагрузку, то на подготовленную площадку может производиться разгрузка судна. На гаке крана должен обязательно находиться динамометр для контроля величины спускаемого на лед груза. Принимаемый на кромку груз должен иметь определенный заранее вес.

Вдали от кромки следует устроить площадку для перегрузки транспорта с небольшой грузоподъемностью, работающего на кромке, на транспорт, использующий полную несущую способность ледяного поля с учетом совместного действия нагрузок в соответствии с ограничениями, задаваемыми рис.3.

Литература

1. Правила по технике безопасности при производстве гидрометеорологических работ. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 70 с.
2. Песчанский И.С. Ледоведение и ледотехника. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 467 с.
3. Тимошенко С.П., Войтковский-Кригер С. Пластинки и оболочки. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 1963. – 635 с.
4. Ионов Б.П. Ледовая ходкость судов /Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. –СПб: Судостроение, 2001-512с.
5. Шапиро Г.С. Изгиб полубесконечной плиты, лежащей на упругом основании // Прикладная математика и механика. – 1943. – Т.VII, вып. 4. – С.316-320
6. Петров И.Г. Выбор вероятных значений механических характеристик льда // Сб. науч. трудов ААНИИ. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – Т.331. – С.4–41..
7. Панфилов Д.Ф. Экспериментальные исследования грузоподъемности ледяного покрова // Известия ВНИИГ. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – Т.65. – С.101-116.
8. Зуев В.А., Грамузов Е.М., Двойченко Ю.А. Экспериментальные исследования разрушения ледяного покрова // Вопросы теории, прочности и проектирования судов, плавающих во льдах: Межвуз. сб. – Горький, 1984. – С.4-19.
9. Каштелян В.И. Приближенное определение усилий, разрушающих ледяной покров // Проблемы Арктики и Антарктики. – 1960. – Вып.5. – С.31-37
10. Себин А. С. Подход к моделированию ледяного покрова на основе критерия прочности льда, полученного при центральном проломе / А. С. Себин, Ю. А. Двойченко // Транспортные системы. – 2017. – №. 2. – С. 30-33.
11. Двойченко Ю.А. К вопросу о предельной деформации ледяного покрова// Теория и прочность ледокольного корабля: Межвуз. сб. - Горький, 1978. С. 47-49.

12. Двойченко Ю.А. Применение вариационно – разностного метода к задачам изгиба ледяного покрова // Проектирование средств продления навигации: Межвуз. сб. Горький, 1986. С. 107-115.

References

1. Pravila po tekhnike bezopasnosti pri proizvodstve gidrometeorologicheskikh rabot [Safety regulations for the production of hydrometeorological works]. L.: Gidrometeoizdat, 1970, 70 s.
2. Peschanskiy I.S. Ledovedenie i ledotekhnika [Ice science and ice engineering]. L.: Gidrometeoizdat, 1967, 467 s.
3. Timoshenko S.P., Voytkovskiy-Kriger S. Plastinki i obolochki [Plates and shells]. M.: Izd-vo fiziko-matematicheskoy literatury, 1963, 635 s.
4. Ionov B.P. Ledovaya khodkost' sudov [Ice seaworthiness of vessels] B.P. Ionov, E.M. Gramuzov. SPb: Sudostroenie, 2001, 512s.
5. Shapiro G.S. Izgib polubeskonechnoy plity, lezhashchey na uprugom osnovanii [Bending of a semi-infinite plate lying on an elastic base] Prikladnaya matematika i mekhanika [Applied Mathematics and Mechanics]. 1943. T.VII, vyp. 4 S.316-320
6. Petrov I.G. Vybory veroyatnykh znacheniy mekhanicheskikh kharakteristik l'da [Selection of probable values of mechanical characteristics of ice], Sb. nauch. trudov AANII. L.: Gidrometeoizdat, 1976. T.331. S.4-41.
7. Panfilov D.F. Eksperimental'nye issledovaniya gruzopod'emnosti ledyanogo pokrova [Experimental studies of the carrying capacity of the ice cover], Izvestiya VNIIG. M.: Gosenergoizdat, 1960. T.65. S.101116.
8. Zuev V.A., Gramuzov E.M., Dvoichenko Yu.A. Eksperimental'nye issledovaniya razrusheniya ledyanogo pokrova [Experimental studies of the destruction of the ice cover], Voprosy teorii, prochnosti i proektirovaniya sudov, plavayushchikh vo l'dakh [Questions of theory, strength and design of vessels floating in ice]: Mezhvuz. sb. Gor'kiy, 1984. S.4-19.
9. Kashtelyan V.I. Priblizhennoe opredelenie usiliy, razrushayushchikh ledyanoy pokrov [Approximate determination of the forces destroying the ice cover], Problemy Arktiki i Antarktiki [Problems of the Arctic and Antarctic]. 1960. Vyp.5. S.31-37
10. Sebin A. S. Podkhod k modelirovaniyu ledyanogo pokrova na osnove kriteriya prochnosti l'da, poluchennogo pri tsentral'nom prolome [An approach to ice cover modeling based on the ice strength criterion obtained at the central break], A. S. Sebin, Yu. A. Dvoichenko // Transportnye sistemy [Transport systems]. 2017, №. 2, S. 30-33.
11. Dvoichenko Yu.A. K voprosu o predel'noy deformatsii ledyanogo pokrova [On the issue of the ultimate deformation of the ice sheet], Teoriya i prochnost' ledokol'nogo korablya [Theory and strength of an icebreaker ship]: Mezhvuz. sb. Gor'kiy, 1978. S. 47-49.
12. Dvoichenko Yu. A. Primenenie variatsionno – raznostnogo metoda k zadacham izgiba ledyanogo pokrova [Application of the variation – difference method to the problems of ice sheet bending], Proektirovanie sredstv prodleniya navigatsii [Design of means of prolongation of navigation]: Mezhvuz. sb. Gor'kiy, 1986. S. 107-115.

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

Юрий Александрович Двойченко, 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

Виктор Федорович Кулепов, доктор технических наук, профессор Дзержинского политехнического института / филиал Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ), 606026, ул. Гайдара, 49/1, г. Дзержинск, Нижегородская обл., e-mail: kulepov@dpinntu.ru

Евгения Владимировна Садекова, кандидат педагогических наук, доцент кафедры кораблестроения и авиационной техники Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ), 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: jane51268@rambler.ru

Yuri A. Dvoichenko, Ph.D. (Eng), assistant professor of 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

Viktor F. Kulepov Dr. Sci. (Eng), Professor of the Dzerzhinsk Polytechnic Institute / Branch of the Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev (NNSTU), Gaidar str. 49/1, Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod region, 606026, Russian Federation, e-mail: kulepov@dpinntu.ru

Evgenia V. Sadekova, Ph.D. (Edu), assistant professor of 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: jane51268@rambler.ru

Андрей Сергеевич Себин, ассистент 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

Andrei S. Sebin, Assistant of 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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 28.06.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 21.07.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 01.08.2023.

Научная статья

УДК 629.124

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.042>

Определение сопротивления сплошного льда движению ледокола с помощью модельного эксперимента

Е.М. Грамузов¹ terkor@nntu.ru, Н.В. Калинина¹ nvk5133@mail.ru,Н.Е. Тихонова¹ netikhonova@gmail.com, С.Н. Хрунков¹ khrunkov@nntu.ru¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Современные ледовые бассейны представляют собой сложные и дорогостоящие сооружения, в которых размеры испытываемых моделей судов ограничены. Поэтому поиск методов моделирования и пересчета ледового сопротивления на натурное судно в открытых бассейнах с естественным охлаждением является актуальным. Описаны условия моделирования движения судов в сплошном ледяном поле в опытовых бассейнах. Показано, что в качестве модельного льда можно использовать тонкий естественный лед и приведена методика пересчета сопротивления модели на натурное судно. Предложен способ определения сопротивления судов путем пересчета с данных по сопротивлению полунатурных моделей, с результатов расчетов по полумпирическим моделям или по результатам модельного эксперимента. Пересчет ледового сопротивления осуществляется по известным зависимостям сопротивления от скорости движения при разных толщинах льда для геометрически подобных корпусов ледоколов с учетом масштаба (модуля пересчета), который равен отношению ширины ледокола к ширине ледокола-прототипа. Использование ширины корпуса в качестве характерного линейного размера обусловлено тем, что она наиболее существенно влияет на сопротивление ледокола. Описанный в статье способ определения сопротивления движению судов в сплошных льдах позволяет прогнозировать ледовую ходкость судов на начальных этапах проектирования, не прибегая к дорогостоящим экспериментальным исследованиям, а также выполнить экспресс оценку ледовой ходкости судна по данным судна-прототипа.

Ключевые слова: ледовый опытовый бассейн, условия моделирования, сопротивление модели судна, пересчет сопротивления на натурное судно, сравнение результатов.

Финансирование: представленные результаты получены по проекту РНФ № 22-19-00376 «Экспериментально-теоретическое исследование полумпирических моделей взаимодействия судов со льдом».

Для цитирования: Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Тихонова Н.Е., Хрунков С.Н. Определение сопротивления сплошного льда движению ледокола с помощью модельного эксперимента, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 3, С. 45—50. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.042

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.042>

Determination of solid ice resistance to icebreaker movement using a model experiment

Eugene M. Gramuzov¹ terkor@nntu.ru, Nadezhda V. Kalinina¹ nvk5133@mail.ru,Natalya E. Tikhonova¹ netikhonova@gmail.com, Sergey N. Khrunkov¹ khrunkov@nntu.ru¹Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev

Abstract. Modern ice basins are complex and expensive structures. In them, the size of the tested models of ships is limited. Therefore, searching for methods for modeling and recalculating ice resistance for a full-scale ship in open basins with natural cooling is relevant. The conditions for modeling the movement of ships in a solid ice field in experimental basins are described. It is shown that thin natural ice can be used as model ice. The method of recalculating the resistance of the model to the resistance of a full-scale ship is given. A method for determining the resistance of ships by recalculation from the data on the resistance of semi-natural models, from the results of calculations based on semi-empirical models, or from the results of a model experiment is proposed. The ship's resistance is calculated by recalculating the known resistance of the prototype vessel depending on the speed of movement for different ice thicknesses. At the same time, geometrically similar icebreaker hulls should be used, considering the scale (conversion module). It is equal to the ratio of the icebreaker's width to the prototype icebreaker's width. The hull width, as a characteristic linear dimension, is used because it most significantly affects the resistance of the icebreaker. The proposed method for determining the resistance to the movement of ships in solid ice makes it possible to predict the ice seaworthiness of ships at the initial stages of design, avoiding expensive experimental studies. Furthermore, the described method allows engineers to quickly assess the ability of the ship to travel through ice based on the results of the prototype ship tests.

Keywords: ice experimental basin, simulation conditions, resistance of ship model, recalculation of resistance to a full-scale vessel, comparison of results.

Financial Support: the presented results were obtained under the project of the Russian Science Foundation No. 22-19-00376 «Experimental and theoretical study of semi-empirical models of the interaction of ships with ice».

For citation: Eugene M. Gramuzov, Nadezhda V. Kalinina, Natalya E. Tikhonova, Sergey N. Khrunkov, Determination of solid ice resistance to icebreaker movement using a model experiment, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 3, P. 45—50. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.042

Введение

Современные ледовые бассейны представляют собой сложные и дорогостоящие сооружения. Размеры моделей испытываемых в них ограничены. Полунатурные модели представляется возможным испытывать только в природных водоемах. Поэтому представляет интерес поиск методов моделирования и пересчета ледового сопротивления в открытых бассейнах с естественным охлаждением. Как известно [2, 3, 5, 8, 9, 10] модуль упругости и константы прочности природного льда в открытых водоемах выше, чем требует классическая теория моделирования [3, 5, 8, 9, 10].

Рассмотрим методы пересчета ледового сопротивления, полученного в результате испытаний в модели ледяного покрова, частично удовлетворяющего условиям моделирования и представляющего собой пресноводный лед [5].

Методы расчета сопротивления сплошного льда движению ледокола будем ориентировать на пересчет сопротивления с прототипа и попутно с полунатурных моделей, испытанных в природных водоемах.

1. Условия моделирования

Анализ условий моделирования будем вести [5] последовательно для всех составляющих ледового сопротивления. Необходимым условием моделирования разрушения является геометрическое подобие картин разрушения льда в плане, при выполнении которого число и расположение точек контакта льда с корпусом при движении модели будет соответствовать натуре.

Подобие картин разрушения определяется подобием напряженно-деформируемого состояния (НДС) ледяных пластин, для определения которого воспользуемся дифференциальным уравнением изгиба пластин, на упругом основании, приведенном к безразмерному виду [5]:

$$\frac{d}{\rho g L^4} \nabla^4 \bar{w} + \bar{w} = 0, \quad (1)$$

где $\bar{w} = w/L$ - безразмерный прогиб; w - прогиб ледяного покрова; L - характерный линейный размер в плане; $d = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ - цилиндрическая жесткость; E , μ - модуль упругости и коэффициент Пуассона для льда; h - толщина льда; ρ - плотность воды.

Из уравнения (1) следует, что НДС ледяного покрова для природы и модели будет подобным если

$$\frac{d_{\text{н}}}{\rho_{\text{н}} L_{\text{н}}^4} = \text{idem} \quad (2)$$

Так как для естественного водоема плотности льда природы и модели равны $\rho_{\text{лн}} = \rho_{\text{лм}}$ и $g = \text{const}$ выражение (2) можно преобразовать к виду

$$\frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{м}}} = \frac{L_{\text{н}}^4}{L_{\text{м}}^4} = \lambda^4, \quad (3)$$

λ - линейный масштаб, индексы «н» и «м» указаны для натурального льда и модельного льда соответственно.

Таким образом, при соблюдении условия (3) будет обеспечено подобие картин разрушения льда в плане и дополнительное требование равенства коэффициентов трения природы и модели

$$f_{\text{н}} = f_{\text{м}}, \quad (4)$$

масштаб сопротивления λ_{R_p} можно определить по формуле

$$\lambda_{R_p} = \frac{\lambda_{Az_i}}{\lambda}, \quad (5)$$

где λ_{Az_i} - масштаб энергии разрушения.

Использованная в формуле (5) энергия ломки ледяного покрова A_{z_i} зависит от механических свойств льда и геометрии ледяной пластины в зоне контакта с корпусом. Причем A_{z_i} есть наиболее полная характеристика механических свойств ледяного покрова с точки зрения разрушения его ледоколом, охватывающая в интегральном виде все этапы разрушения ледяного покрова - от образования трещин до полного пролома. Применение этого критерия сглаживает некоторые неточности в моделировании отдельных этапов разрушения [5].

Анализ моделирования составляющих преодоления обломков R_o и сопротивления воды при сохранении геометрического подобия по толщине льда $h_{\text{н}}/h_{\text{м}} = \lambda$ и размера обломков льда приводит [5] к условиям, когда R_o пересчитывается на натуру в соответствии с масштабом

$$\lambda_{R_o} = \lambda^3, \quad (6)$$

а сопротивление воды в соответствии с классическими способами пересчета.

Нетрудно заметить, что условия (3) и (6) предъявляют к модели ледяного покрова более легкие требования, чем классическая теория моделирования а, следовательно, упрощается выбор материала для модели льда.

Отметим, что формула (3) не противоречит строгой теории моделирования. Однако использование формул (3) и (6) позволяет расширить поиски модели льда.

2. Моделирование в естественном льду

Сразу следует заметить, что естественный лед обладает повышенной прочностью, чем требует строгая теория моделирования, поэтому широкое распространение получило мнение о невозможности его использования в качестве модели ледяного покрова [8, 9, 10]

Идея использования натурального льда состоит в попытке компенсации повышенной прочности меньшей толщиной, чем требуется [4, 5].

Для определения масштаба пересчета толщины льда воспользуемся условием (3), тогда

$$\frac{E_{\text{н}} h_{\text{н}}^3 (1-\mu_{\text{н}}^2)}{E_{\text{м}} h_{\text{м}}^3 (1-\mu_{\text{м}}^2)} = \lambda^4. \quad (7)$$

Учитывая, что в естественном льду равенство $\mu_n = \mu_m$ выполняется автоматически, получим выражение для масштаба пересчета толщины льда

$$\lambda_h = \frac{h_n}{h_m} = \lambda^{4/3} \lambda_E^{-1/3}; \quad \lambda_E = \frac{E_n}{E_m}. \quad (8)$$

Таким образом, если толщина модели льда

$$h_m = h_n \lambda^{-4/3} \lambda_E^{1/3}, \quad (9)$$

то картина разрушения льда в плане будет подобна, а, следовательно, одинаковыми будут число и расположение точек контакта ледокола со льдом.

Равенство коэффициентов трения корпуса о кромку льда для модели и натуре обеспечивается соответствующим подбором покрытия модели. Постоянство отношения энергии локального разрушения кромки к энергии ломки ледяного покрова для модели из натурального льда обеспечить не удается. Однако, учитывая малую долю энергии смятия кромки в общем балансе сопротивления, этим фактом можно пренебречь. Хотя, строго говоря, это обстоятельство может привести к появлению масштабного эффекта.

Выражение для масштаба энергии ломки ледяного покрова имеет вид

$$\lambda_{A_z} = \frac{h_n^4 d_m \alpha_m^2}{h_m^4 d_n \alpha_n^2} = \lambda_h^4 \lambda^{-2}. \quad (10)$$

Модуль пересчета сил сопротивления разрушению льда получим, подставляя в формулу (5) выражения для λ_{A_z} , λ_h и λ_E :

$$\lambda_{R_p} = \lambda^3. \quad (11)$$

Следовательно, составляющая сопротивления R_p , связанная с разрушением льда, пересчитывается на натуру по кубу линейного масштаба модели λ^3 и естественным образом совпадает с модулем пересчета сил моделирующихся по критерию Фруда.

Можно показать, что, несмотря на несовпадение масштаба толщины λ_h с геометрическим модулем подобия λ , масштаб прогибов льда $\lambda_w = \lambda$.

Условия моделирования, связанные с сопротивлением обломков льда R_o , при испытаниях в естественном льду выполняются полностью за исключением равенства масштаба толщины льда λ_h геометрическому модулю подобия λ (8). Это приводит к занижению сил плавучести льдин. Следовательно, строго говоря, совместное моделирование сил разрушения и преодоления обломков льда невозможно.

Чтобы избежать масштабного эффекта, связанного с несоответствием толщины льда в составляющей R_o необходимо экспериментальное разделение составляющих сопротивления.

Для этого, кроме испытаний в сплошном льду, проводятся испытания в десятибалльном битом льду различной толщины. Затем определяются зависимости сопротивления, связанные с разрушением льда $R_{p_m}(v)$ для всего набора толщин

$$R_{p_m}(v) = R_m(v) - R_{o_m}(v) \quad \text{при } h = \text{const}. \quad (12)$$

Пересчет на натуру для составляющих R_{p_n} и R_{o_n} ведется раздельно. При пересчете R_{p_n} используются формулы

$$R_{p_n} = \lambda^3 R_{p_m}; \quad h_n = h_m \lambda^{4/3} \lambda_E^{1/3}; \quad v_n = v_m \sqrt{\lambda}. \quad (13)$$

При пересчете составляющей обломков с помощью интерполяции выбираются зависимости с толщинами льда $h_m = h_n / \lambda$, которые пересчитываются по последним двум формулам:

$$R_{o_n} = \lambda^3 R_{o_m}, \quad h_n = \lambda h_m, \quad v_n = v_m \sqrt{\lambda}. \quad (14)$$

Сопротивление воды R_b может быть выделено из R_o и пересчитано традиционными способами, используя испытания модели судна в чистой воде. Однако, как правило, необходимости в этом нет из-за его малости, а пересчет можно вести совместно R_o по кубу масштаба.

При заданной суммарной тяге винтов ледокола $P_e = f(v)$ диаграмма ледопроеходимости $v = f(h)$ определяется совместным графическим решением уравнений

$$R = f(v, h); \quad P_e = f(v); \quad R = P_e. \quad (15)$$

Кроме того, подвергался проверке упрощенный метод пересчета без разделения сопротивления на составляющие [5]. Эксперименты показали, что удовлетворительных результатов можно добиться, пересчитывая полное сопротивление модели на натуру по формулам [5]:

$$R_n = \lambda^3 R_m, \quad h_n = h_m \lambda^{4/3}, \quad v_n = v_m \sqrt{\lambda}. \quad (16)$$

Отметим, что описанный метод моделирования не противопоставляется более строгому методу, основанному на подборе материала модели льда. Однако, он позволяет расширить объемы модельных исследований, используя для них открытые бассейны и естественные водоемы, а также производить испытания крупномасштабных и полунатурных моделей.

3. Пересчет ледового сопротивления с прототипа

Зависимостями (16) можно воспользоваться для расчетов ледовой ходкости в сплошном льду с использованием прототипа. Если у прототипа известны зависимости сопротивления от скорости движения для разных толщин льда, то пересчет сопротивления осуществляется аналогично упрощенному пересчету модельных испытаний. Корпуса ледоколов различных проектов геометрически не подобны, поэтому в качестве прототипа следует выбирать ледокол с похожим характером обводов носовой оконечности. Их в настоящее время по существу 2 типа: классические обводы, начиная с ледокола «Ермак» проекта Р-1039, и ложкообразные, как у ледокола «Капитан Евдокимов» проекта 1191. При этом точность определения сопротивления пересчетом с прототипа должна превышать точность расчетов по существующим полуэмпирическим моделям, в которых форма носовой оконечности вовсе не учитывается.

Под масштабом (модулем пересчета) λ при пересчете сопротивления следует понимать отношение ширины ледокола B и ширины ледокола - прототипа B_0 : $\lambda = B/B_0$. Использование ширины корпуса в качестве характерного линейного размера обусловлено тем, что она наиболее существенно

влияет на сопротивление ледокола, а постоянное отношение ширины к характерной длине изгиба ледяной пластины обеспечивает подобную картину разрушения ледяного покрова в плане (рядность ломки льда).

Таким образом, пересчет сопротивления сплошного льда движению ледокола с прототипа следует вести по формулам:

$$R = \lambda^3 R_0, h = h_0 \lambda^{4/3}, v = v_0 \sqrt{\lambda}. \quad (17)$$

Такой пересчет был сделан на примере двух ледоколов. Чистое ледовое сопротивление сплошного льда движению ледокола проекта 1105 «Капитан Зарубин» (рис. 1) было пересчитано по предложенной методике на чистое ледовое сопротивление сплошного льда движению ледокола проекта 21900 «Москва» (рис. 2). Характеристики этих ледоколов приведены в табл. 1.

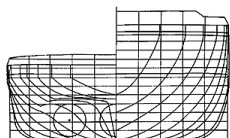


Рис. 1 Ледокол проекта 1105 «Капитан Зарубин»

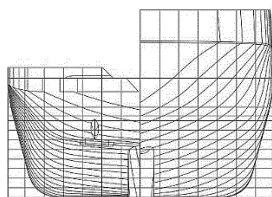


Рис. 2. Ледокол проекта 21900 «Москва»

Таблица 1
Основные характеристики ледоколов

№ п/п	Характеристика	«Москва», пр. 21900	«Капитан Зарубин», пр. 1105
1.	Класс судна	Icebreaker 6	«* ЭМ2 (ледокол)»
2.	Длина между перпендикулярами L , м	104,0	71,0
3.	Ширина судна по КВЛ B , м	27,5	16,0

4.	Высота борта H , м	12,4	4,8
5.	Осадка T , м	8,5	3,2
6.	Водоизмещение D , т	14300	2472
7.	Коэффициент общей полноты δ	0,573	0,610
8.	Мощность на гребных валах N , кВт	16400	3300
9.	Скорость на чистой воде v , узл. / м/с	17 / 8,7	13,9 / 7,14
10.	Тяга на швартовах, кН	1640	414
11.	Предельная ледопроходимость, м	до 1,5	0,75
12.	Площадь зоны облегаания льдом, м ²	1430	510

Расчет ледового сопротивления для ледокола проекта 1105 «Капитан Зарубин» был произведен по известной методике Е.М.Грамузова [5], разработанной в НГТУ, которая учитывает не только главные размеры судна, но и форму корпуса, физико-механические характеристики льда и снега. Форма корпуса учитывается путем введения в расчетную модель интегральных функций геометрии, которые получены из пространственного рассмотрения взаимодействия корпуса судна со льдом [5]. Сопротивление снега в расчетах не учитывалось. Полагалось, что судно движется в ровном сплошном бесснежном льду. Зависимости сопротивления от скорости движения для различных толщин льда приведены на рис. 3. По ним построена диаграмма ледопроходимости ледокола проекта 1105 на рис. 4.

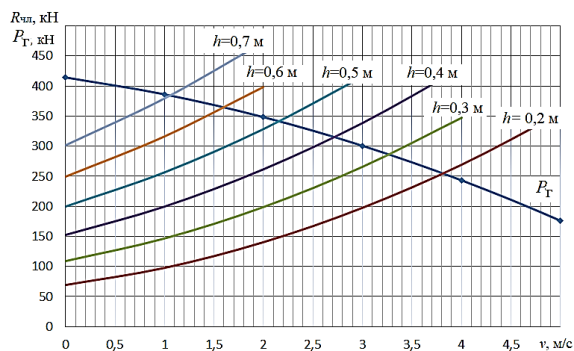


Рис. 3. Зависимости чистого ледового сопротивления и тяги на гаке ледокола проекта 1105

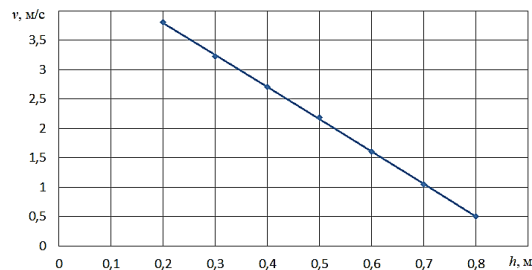


Рис. 4. Диаграмма ледопроходимости ледокола проекта 1105

Результаты пересчета сопротивления ледокола пр. 1105 на сопротивление ледокола пр. 21900

приведены на рис. 5. Масштаб (модулем пересчета) составил $\lambda = 27,5/16,0 = 1,72$. На рис. 6 представлены диаграммы ледопроеходимости ледокола проекта 21900, полученные в результате пересчета, модельных и натурных испытаний этого ледокола [1, 6, 7].

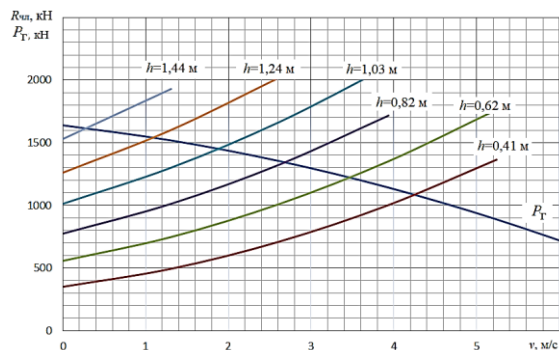


Рис. 5. Зависимости чистого ледового сопротивления и тяги на галке ледокола проекта 21900

Расхождение значений (рис. 6) можно объяснить следующим образом. Натурный эксперимент проходил в ледовых условиях с разрушенностью 1...2 балла [1]. Соответственно скорость движения в таком льду выше. Во время натурного эксперимента на льду всегда присутствует снег. Физико-механические характеристики натурального морского льда отличаются от среднестатистических пресноводного бесснежного льда, заложенных в расчет сопротивления ледокола проекта 1105. Следует отметить различие форм корпусов

ледоколов проектов 1105 и 21900, различные соотношения главных размерений.

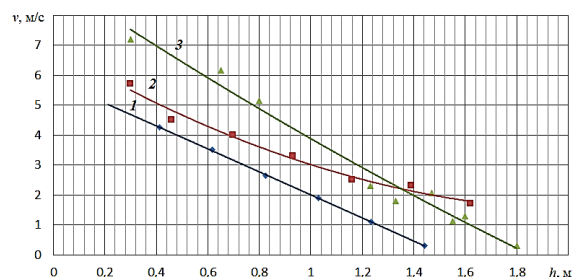


Рис. 6. Диаграммы ледопроеходимости ледокола проекта 21900, полученные в результате: 1- пересчета с прототипа; 2- модельного эксперимента с пересчетом на натурное судно; 3- натурного эксперимента

Диаграмма ледопроеходимости, полученная в условиях модельного эксперимента, тоже превышает расчетную. Это связано с тем, что пересчет результатов модельного эксперимента был произведен по упрощенной методике без разделения сопротивления на составляющие разрушения и обломков льда. Но несмотря на перечисленные причины, результаты пересчета (рис. 6) можно использовать для оценки ледовой ходкости.

Заключение

Описанный способ определения сопротивления движению судов в сплошных льдах позволит прогнозировать ходкость на начальных этапах проектирования, не прибегая к дорогостоящим экспериментальным исследованиям, а также выполнить экспресс оценку ледовой ходкости судна с использованием данных судов-прототипов.

Литература

1. Апполонов Е.М., Беляшов В.А., Сазонов К.Е., Скрябин Д.С., Игошин Е.В. Исследование ледовой ходкости ледокола «Санкт-Петербург» в Карском море // Судостроение, 2011, № 4. С. 9-12.
2. Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Куркин А.А. Физическое моделирование сопротивления сплошного льда движению судов // Экологические системы и приборы № 12. 2022. С 82 – 89.
3. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Моделирование в морской ледотехнике // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 4. С. 557-567.
4. Зуев В.А., Беляков В.Б., Грамузов Е.М. Способ испытания моделей судов ледового плавания / А.с. № 1071515 от 07.02.84. Оpubл. 07.02.84, Бюл. № 5.
5. Ионов Б.П., Грамузов Е.Н. Ледовая ходкость судов: Монография.– СПб.: Судостроение, 2001.– 512 с.
6. 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.
7. 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.
8. Ногид Л.М. Моделирование движения судна в сплошном ледяном поле и битых льдах // Сб. науч. тр. / ЛКИ.- Л., 1959.- Вып.28.- С.179-185.
9. Сазонов К.Е. Модельный и натурный эксперименты в морской ледотехнике // Санкт-Петербург: Крыловский государственный научный центр, 2021.
10. Шиманский Ю.А. Теория моделирования движения судна в сплошном ледяном поле // Сб. науч. тр. / ААНИИ.- Л., 1960.- Т.237.- С.39-29.

References

1. 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.
2. Gramuzov E.M., Kalinina N.V., Kurkin A.A. Fizicheskoe modelirovanie soprotivleniya sploshnogo l'da dvizheniju sudov [Physical modeling of solid ice resistance to ship movement]. Jekologicheskie sistemy i pribory № 12. 2022. S 82 ... 89.

3. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Modelirovanie v morskoy ledotehnike [Modeling in marine ice engineering]. Arktika: jekologija i jekonomika. 2021. T. 11. № 4. S. 557...567.
4. Zuev V.A., Beljakov V.B., Gramuzov E.M. Sposob ispytaniya modelej sudov ledovogo plavaniya [Method of testing models of ice navigation vessels]. A.s. № 1071515 ot 07.02.84. Opubl. 07.02.84, Bjul. № 5.
5. Ionov B.P., Gramuzov E.N. Ledovaya khodkost' sudov [Ice propulsion of ships]: Monografiya, SPb.: Sudostroenie, 2001. 512 s.
6. 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.
7. 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.
8. Nogid L.M. Modelirovanie dvizheniya sudna v sploshnom ledyanom pole i bitykh l'dakh [Simulation of vessel movement in a continuous ice field and broken ice]. Sb. nauch. tr., LKI. L., 1959, Vyp. 28. S.179...185.
9. Sazonov K.E. Model'nyy i naturnyy eksperimenty v morskoy ledotehnike [Model and full-scale experiments in marine ice engineering] // Sankt-Peterburg: Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr, 2021.
10. Shimanskiy Yu.A. Teoriya modelirovaniya dvizheniya sudna v sploshnom ledyanom pole [Theory of modeling the movement of a ship in a continuous ice field]. Sb. nauch. tr. AANIL. L., 1960, T.237. S.39...29.

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

Евгений Михайлович Грамузов, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, 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, 603950, Russian Federation, e-mail: terkor@nntu.ru

Надежда Викторовна Калинина, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, 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, 603950, Russian Federation, e-mail: nvk5133@mail.ru

Наталья Евгеньевна Тихонова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая механика и детали машин», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: netikhonova@gmail.com

Natalya E. Tikhonova, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department «Theoretical mechanics and machine parts», Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: netikhonova@gmail.com

Сергей Николаевич Хрунков, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Энергетические установки и тепловые двигатели», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: khrunkov@nntu.ru

Sergey N. Khrunkov, Dr. Sci. (Eng.), assistant professor, Head of the Department «Power Plants and Thermal Engines», Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: khrunkov@nntu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.06.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 14.07.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 10.08.2023.

Научная статья

УДК 629.5.03 629.5.016

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.043>

Особенности комплектации пропульсивного комплекса крупнотоннажных транспортных судов ледового плавания

А.А. Добродеев^{1,2} stamukha@yandex.ru, **Г.А. Архипов**¹ arhipov.georgij@yandex.ru, **Н.Ю. Родионов**^{1,2} nikolay_rodionov97@mail.ru

¹Крыловский государственный научный центр, Российская Федерация, ²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация Создание современного флота крупнотоннажных судов, предназначенных для круглогодичной работы в Арктических условиях, должно быть основано на применении комплексной оценки ходовых и ледовых качеств, характеристик энергетической установки и режимов работы пропульсивного комплекса на стадии эскизного проектирования. Такой подход в условиях существующих ограничений на поставку импортного судового оборудования позволяет разработать наиболее эффективные технические решения для судна. Настоящая работа посвящена поиску и определению основных проектных решений при создании отечественного крупнотоннажного транспортного судна ледового класса Arc7, предназначенного для вывоза полезных ископаемых из шельфовых месторождений Арктики. Поиск указанных решений был выполнен при условии комплектации энергетической установки и движительно-рулевого (ДРК) комплекса оборудованием отечественного производства. Значения потребной мощности энергетической установки (ЭУ) были определены в ходе проведённых расчётов при помощи существующих численных методик. Далее, в работе рассматриваются различные варианты комплектации ЭУ и проводится численный анализ и сравнение на основе выбранных значений весовых функций сравниваемых характеристик ЭУ.

Ключевые слова: судовая энергетика, лёд, ледовое сопротивление, крупнотоннажное транспортное судно, удельный расход топлива.

Благодарности: Авторы выражают благодарность коллективу лаборатории ледотехники ФГУП «Крыловский государственный научный центр» и коллективу кафедры СЭУ, СиО ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00039, <https://rscf.ru/project/23-19-00039/> «Теоретические основы и прикладные инструменты для создания системы интеллектуального планирования работы флота и поддержки принятия решений в арктическом судоходстве».

Для цитирования: Добродеев А.А., Родионов Н.Ю., Архипов Г.А., Особенности комплектации пропульсивного комплекса крупнотоннажных транспортных судов ледового плавания, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 3, С. 51—57. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.043

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.043>

Peculiarity of the designing the propulsion complex for large-tonnage ice-class transport vessels

Aleksei A. Dobrodeev^{1,2} stamukha@yandex.ru, **Georgij A. Arhipov**¹ arhipov.georgij@yandex.ru, **Nikolay Yu. Rodionov**^{1,2} nikolay_rodionov97@mail.ru

¹ St. Petersburg state marine technical University, ²Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract The comprehensive assessment of ship and ice performance, the power plant and operating modes of the propulsion complex characteristics at the stage of preliminary design must be the foundation of modern large-size vessels fleet intended for year-round operation in Arctic conditions. This approach allows to develop the most effective technical solutions for the vessels under existing restrictions on the supply of imported ship equipment. The presented work is devoted to the search and determination of the main design solutions for the creation of a domestic large-tonnage transport vessel of the Arc7 ice class intended for the export of minerals from the deposits of the Arctic region. The search for these solutions was carried out under the condition that the power plant and the propulsion complex (PC) were equipped with equipment of domestic production. The values of the required power of the power plant (PP) were determined during the calculations using existing numerical methods. Further, the paper considers various options for the configuration of the PP and performs a numerical analysis and comparison based on the selected values of the weight functions of the compared characteristics of the PC.

Keywords: marine power engineering, ice, ice resistance, large-tonnage transport vessel, fuel consumption.

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the staff of the Ice basin laboratory of "Krylov State Research Centre" and the staff of the Department of SPP, S&E of the St. Petersburg State Maritime Technical University

Funding: The research was supported by the Russian Science Foundation project № 23-19-00039, <https://rscf.ru/project/23-19-00039/> "Theoretical foundations and applied instruments to develop a system for intelligent fleet planning and decision support in the Arctic shipping").

For citation: Dobrodeev A.A., Rodionov N.Yu., Arhipov G.A., Peculiarity of the designing the propulsion complex for large-tonnage ice-class transport vessels, Marine Intelligent Technologies. 2023. № 3 part 3, P. 51—57. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.043

Введение

Вывоз углеводородных полезных ископаемых с месторождений Крайнего Севера является одной из важнейших задач, стоящих перед отечественной судостроительной областью.

Одно из наиболее важных мест в ряду транспортных судов, предназначенных для решения указанной задачи, занимают суда-газовозы.



Рис. 1. Судно-газовоз класса «Ямалмакс»

Транспортировка сжиженного природного газа является одним из самых сложных элементов создаваемой Арктической транспортной системы.

При создании новых проектов подобных судов необходимо следовать особо жёстким требованиям, предъявляемым к ним – прежде всего к характеристикам ледовой ходкости, энергетической эффективности вкуче с низкими показателями вредных выбросов, а также к показателям безопасности перевозки груза, надёжности грузовых танков и т.д.

Помимо газовозов в Арктическом регионе эксплуатируются суда для перевозки сырой нефти – крупнотоннажные танкеры, построенные с учётом особых требований к эксплуатации в рассматриваемом регионе и имеющие высокие ледовые классы. На сегодняшний день отечественный флот имеет в своём составе целый ряд подобных судов, имеющих различное водоизмещение и ледовый класс.

Также, всё большее внимание специалистов судостроительной области привлекают крупнотоннажные контейнеровозы высокого ледового класса (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид арктического контейнеровоза

Подобные суда будут способны значительно увеличить объём грузоперевозок по Северному морскому пути и доставлять большую номенклатуру грузов из Азии в Европу. Работы в данном направлении активно ведутся уже сейчас. Однако для эффективной работы подобных судов, предварительно необходимо также развитие транспортной инфраструктуры, прежде всего портовых.

Отдельного рассмотрения требуют балкеры, предназначенные для вывоза каменного угля и различных руд с месторождений Крайнего Севера. Эксплуатировать подобные суда предполагается при помощи проводки их за ледоколом [9].

Таким образом, для успешного функционирования Арктической транспортной системы, вывоза необходимого объёма углеводородов и перевозки товаров требуется дальнейшее строительство крупнотоннажных транспортных судов различного назначения и класса.

Важным фактором при строительстве указанных типов судов, на сегодняшний день, является отсутствие возможности комплектации судов оборудованием иностранного производства. К числу подобных элементов можно отнести основные элементы энергетической установки судна и его движительно-рулевого комплекса.

Задачей представляемого исследования является разработка и анализ основных решений по выбору формы обводов, типа движительно-рулевого комплекса и главной энергетической установки отечественного крупнотоннажного транспортного судна класса Arc7, которые требуется принимать на этапе его эскизного проектирования.

В рамках работы над представленным исследованием был создан прототип транспортного судна класса Arc7 (рис. 3).

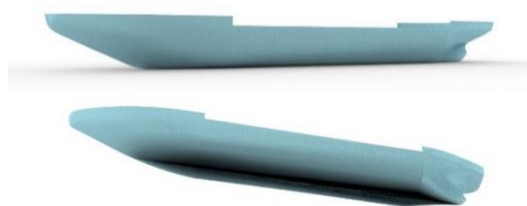


Рис. 3. Общий вид прототипа транспортного судна класса Arc7

В рамках данного исследования для решения задачи перевозки углеводородов (сжиженного природного газа или нефтепродуктов) в Арктическом регионе приняты следующие главные размерения судна: длина – около 270 м, ширина – 43 и осадка – 13 м. Величина осадки является близкой к максимальной в рассматриваемом районе эксплуатации по причине малых глубин. Судно имеет ледокольные обводы носовой оконечности и наклон борта на уровне ватерлинии по длине цилиндрической вставки, уменьшающий эффект от воздействия ледовых сжатий на корпус. Значение ширины судна выбрано на основе опыта проведения модельных испытаний различного типа

крупнотоннажных судов в ледовом опытовом бассейне [5]. Основные характеристики предлагаемого судна указаны в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики транспортного судна

Характеристика	Значение
Длина, м	270
Ширина, м	43
Осадка, м	13
Ледопроездимость	Ледовый класс Arc7 (Самостоятельное плавание в сплошных однолетних арктических льдах при их толщине до 1,5 м в зимне-весеннюю навигацию и до 1,7 м в летнее-осеннюю)
Полная мощность ЭУ	45 МВт
Пропульсивный комплекс	3 ВФШ, установленных на валопинях или 1 ВФШ и две ВРК малой мощности. Пропульсивная мощность 38 МВт

При выбранной ширине корпуса в случае движения под проводкой ледокола пр.22220 судно будет доламывать кромки ледового канала, ширина которого в среднем составляет от 34 до 36 м в зависимости от толщины ледяного покрова. Это эффективный режим движения судна в узком канале при наличии оптимальной формы корпуса носовой оконечности.

В случае рассмотрения меньшей ширины корпуса, сопоставимой с шириной ледового канала, возможно возникновения эффекта заклинивания судна в нем, особенно при движении по криволинейной траектории. [2] Увеличение ширины корпуса приведет к росту ледового сопротивления, компенсация которого при наличии ледокольных обводов корпуса возможна только за счет роста пропульсивной мощности (рис. 4).



Рис. 4. Буксировочные испытания модели крупнотоннажного транспортного судна в канале за ледоколом

Для оценки значений сопротивления движению судна во льдах были выполнены расчёты при помощи метода Б.П.Ионова. Полученные значения ледового сопротивления при движении в ровном сплошном льду различной толщины приведены на рисунке 5.

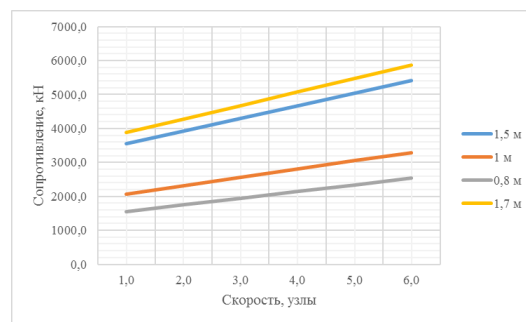


Рис. 5. Ледовое сопротивление движению судна в ровном льду

Требуемая мощность энергетической установки при движении в ровном сплошном льду толщиной 1,5 м со скоростью 2 узла будет равна 38 МВт. Данное значение было определено при помощи метода из [6].

Далее, была проведена оценка ледового сопротивления движению судна в битых льдах при помощи метода из [10], результаты которой приведены на рис. 6.

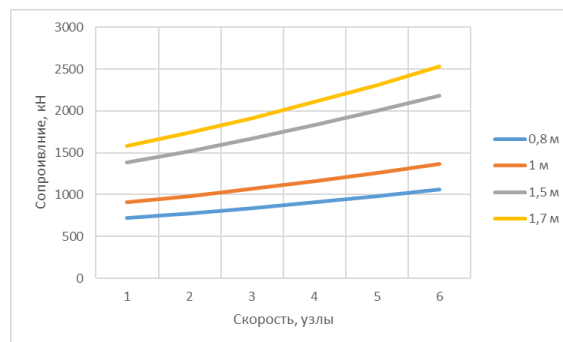


Рис. 6. Ледовое сопротивление движению судна в битом льду

Комплектация энергетической установки судна

В рамках представляемого исследования был проведён анализ существующих и серийно производимых элементов судовой энергетической установки. Прежде всего рассматривались варианты установки главных двигателей различного типа.

На территории Российской Федерации расположены несколько крупных производителей главных двигателей разных типов, что позволяет рассматривать и производить анализ нескольких вариантов комплектации СЭУ крупнотоннажного транспортного судна.

В качестве рассматриваемых вариантов главного оборудования СЭУ приняты три схемы:

- ЭУ с двумя паротурбинными установками ПТУ-72 с низкими параметрами пара и паропроизводящей установкой, работающей на тяжёлом топливе;
- ЭУ с семью среднеоборотными дизельными двигателями (СОД) Д500 (16СН26,5/31);
- ЭУ с шестью газотурбинными двигателями (ГТД) Е70/8РД.

Рассмотрим каждый из вариантов более подробно.

Паротурбинная установка ПТУ-72 является серийно производимой и успешно эксплуатируемой на ледоколах пр. 22220. В случае с ледоколами ЛК-60 паропроизводящая установка является атомной. Для рассматриваемого проекта предполагается замена установки на использующую тяжёлое топливо, либо выпар сжиженного природного газа.

СОД Д500 (16ЧН26,5/31) Коломенского завода имеет мощность около 6500 кВт и может использоваться на судах в качестве главного либо вспомогательного дизель-генератора (рис. 7).

При значительно меньшем расходе топлива чем у установки ПТУ-72, комплектация ЭУ данными двигателями и их эксплуатация в количестве 7 агрегатов является сложной задачей.

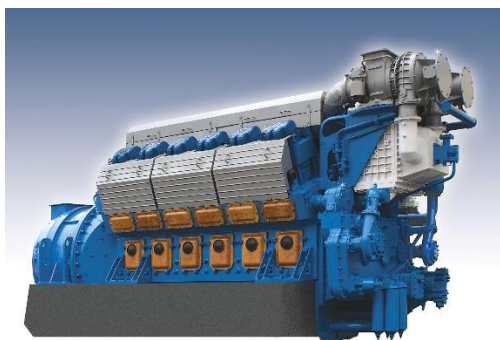


Рис. 7. Дизельный двигатель Д500

Газотурбинный двигатель Е70/8РД имеет агрегатную мощность 8 МВт и приспособлен для работы на газу. ГТД прошёл все необходимые испытания, может быть изготовлен серийно и приспособлен для работы на судах. При этом массогабаритные характеристики ЭУ данной конфигурации значительно ниже, чем у предыдущих двух вариантов.

Отдельного уточнения требует значение достижимого ресурса ГТД, а точнее межремонтного интервала, лимитированного ресурсом лопаток турбины первых ступеней.

Для комплексного сравнения вариантов ЭУ в работе были выполнены соответствующие расчёты при помощи методики квалиметрического анализа:

$$Q_A = \sum_{n=1}^N (\alpha_n \cdot q_n)$$

где α – весовой коэффициент; q – значение рассматриваемого параметра.

Исходя из требований к эксплуатации транспортных судов, наиболее важными характеристиками в работе были назначены КПД установки (т.е. её экономичность), ресурс и массогабаритные характеристики (как следствие – объём перевозимого груза). Стоимость изготовления не была рассмотрена по причине отсутствия необходимой информации. Определение надёжности предложенных вариантов ЭУ является отдельной комплексной задачей и в рамки исследования не входит.

Полученные результаты анализа приведены на рисунке 8.

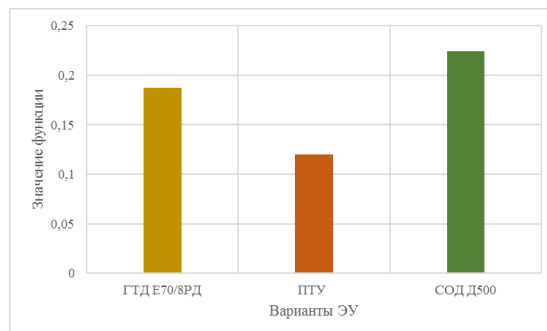


Рис. 8. Сравнение различных типов ЭУ

Анализ результатов показал, что наиболее эффективной комплектацией установки является ЭУ с СОД. Однако, применительно к рассматриваемому проекту транспортного судна, решение об установке 7 СОД вызывает сомнения в своей целесообразности. Также, значение удельного расхода топлива, по мнению авторов статьи, требует уточнения, совместно с проработкой работы двигателя 16ЧН26,5/31 на СПГ.

Представляет интерес сравнение вариантов ПТУ и ЭУ с ГТД. При значительно большем расходе топлива и худших массогабаритных характеристиках, ПТУ-72 обладает неоспоримым преимуществом в части отработанности конструкции и высокого ресурса (рис. 9). Но, несмотря на высокий ресурс, эксплуатация паропроизводящей установки требует особого внимания и частого ремонта. Низкие параметры пара не позволяют сильно повысить КПД, изменение же начальных параметров требует переработки всей установки.



Рис. 9. Установка ПТУ-72 (один блок)

ЭУ с ГТД имеет наибольшее значение удельной мощности среди сравниваемых вариантов при незначительном отличии в расходе топлива по сравнению с СОД. Модернизация ГТД позволила довести межремонтный интервал до 25000 часов, а возможность работы на выпаре СПГ позволяет соответствовать современным требованиям в сфере регламентации вредных выбросов.

Таким образом, исходя из проведённого анализа и возможностей отечественной промышленности можно сделать следующие выводы:

- для ЭУ судов-газовозов можно рекомендовать установку с ГТД, работающими на выпаре перевозимого груза СПГ.

Установка соответствует всем нормам по объёму вредных выбросов вкупе с лучшими показателями удельной мощности и высокими показателями

расхода топлива. При установке на других типах судов потребуется создание специализированной системы хранения СПГ, так как двигатель E70/8РД не приспособлен для работы на тяжёлом топливе, а стоимость эксплуатации на дизельном топливе будет значительно выше;

- для судов других типов представляется возможным установка ПТУ-72 с наладкой работы парогенераторов на тяжёлом топливе. При этом существующие размерения судна и, соответственно, потребная мощность ЭУ требует комплектование ЭУ двумя турбогенераторами и тремя парогенераторами, имеющими худшие массогабаритные показатели среди сравниваемых вариантов. Для повышения эксплуатационных характеристик проектируемого судна можно уменьшить его водоизмещение и значение потребной мощности ЭУ до достижимых установкой одной ПТУ-72.

Комплектация судна движительно-рулевым комплексом

На сегодняшний день существует несколько вариантов данной компоновки. Судно может быть оборудовано винто-рулевыми колонками, традиционными движителями, установленными на валоподлинках, или комбинированным движительно-рулевым комплексом.

На основании заданных требований комплектации судна оборудованием отечественного производства, наличествует выбор только между двумя типами движительно-рулевых комплексов - комбинированным (состоящий из ВФШ на валу, расположенного в диаметральной плоскости судна и двух ВРК по бортам) и конвенциональным (состоящий из трёх ВФШ, установленных на валах). Первый тип предназначен для повышения характеристик маневренности судна при эксплуатации в ледовых условиях и позволяет судну двигаться кормой вперед. Для создания вращающего момента при маневрировании и управления судном используются ВРК. В рамках данной статьи рассмотрен вариант комбинированного движительно-рулевого комплекса, состоящий из валоподлинки с пропульсивной мощностью 20 МВт, расположенной в диаметральной плоскости судна и двух ВРК ледового класса мощностью по 10 МВт каждая. Проработка подобного рода ВРК была выполнена Крыловским центром в рамках работы над электродвижительной рулевой колонкой (ЭДРК). Конвенциональный тип, с другой стороны, обеспечивает максимальные тяговые характеристики на переднем ходу. Однако данный вариант менее эффективен применительно к крупнотоннажным транспортным судам, которые должны иметь возможность маневрировать в тяжелых ледовых условиях и иметь возможность движения кормой. Также, движение кормой вперед в данном варианте может быть опасно по причине расположения рулей и возможности их повреждения. В свою очередь, необходимость в установке рулей в первом рассмотренном варианте отсутствует.

Выбор между двумя этими вариантами должен осуществляться на основании модели эксплуатации судна, в которой необходимо определить возможность оперативного обеспечения проводки судна атомными ледоколами в сложных ледовых условиях. Если такая возможность есть, конвенциональный вариант судна является более предпочтительным. В отсутствие возможности организации регулярной проводки подобного рода транспортных судов, они должны быть оснащены комбинированным движительно-рулевым комплексом, чтобы иметь возможность работать как носом, так и кормой вперед.

По результатам проработки пропульсивного комплекса были сформированы рендеры двух концепций транспортного судна с принципиально отличающимися вариантами кормовой оконечности судна - с традиционными движителями (рисунок 3) и с комбинированным движительно-рулевым комплексом (рисунок 10).

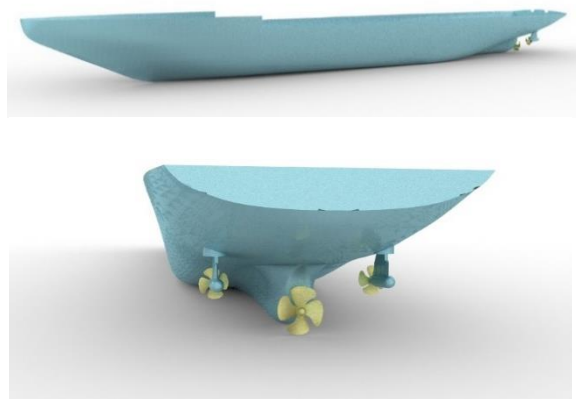


Рис. 10. Вариант транспортного судна класса Arc7, оснащённого комбинированным движительно-рулевым комплексом

Заключение

Таким образом, в представляемом исследовании были получены следующие результаты:

- выполнена проработка основных проектных решений по крупнотоннажному транспортному судну, предназначенному для круглогодичной эксплуатации на трассах Северного Морского Пути;
- разработаны несколько вариантов кормовой оконечности судна с различными схемами движительно-рулевого комплекса;
- проведена исследовательская работа по установлению возможных вариантов комплектации СЭУ с различными типами главных двигателей отечественного производства;
- на основании результатов проведённого анализа установлено, что для судов оснащаемых ПТУ целесообразно уменьшить значение потребной мощности ЭУ за счёт уменьшения размерений судна и оптимизации формы корпуса;
- произведена комплектация движительно-рулевого комплекса отечественным и серийно производимым оборудованием.

Литература

1. Глебко Ю.В., Цой Л.Г., Штрек А.А. Крупнотоннажные суда в Арктике: реальность и перспективы // Морской флот. – 2017, № 3.. Морской флот №3 (2017).
2. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Экспериментальные исследования возможности проводки ледоколом крупнотоннажных судов при буксировке вплотную. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О.Макарова. 2022; 14(5): 645–655. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-645-655.
3. Половинкин В.Н., Фомичев А.Б. Проблемы импортозамещения в отечественной экономике. Ж. Экспертный союз № 2 (12), 2014 г., стр. 30–33.
4. Рыжов В.Н. Трудности создания корабельных двигателей и перспективы дизелестроения. «и-Маш (i-Mash.ru)», 2015.
5. Сазонов К.Е., Добродеев А.А. Ледовая ходкость крупнотоннажных судов. СПб., 2017.
6. Сазонов К.Е. Теоретические основы плавания судов во льдах/ ЦНИИ им.ак. А.Н.Крылова, Санкт-Петербург, 2010.
7. Справочник по теории корабля. В трех томах., т.1. Гидродинамика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. /Под ред. Я.И. Войткунского. - Л.: Судостроение, 1985. 768 с.
8. Зуев В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях. Л.: Судостроение, 1986, 208 с.
9. Родионов Н.Ю. Разработка коэффициента, определяющего связь между показателями ледовой ходкости судна и эффективностью его энергетической установки // научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства – избранные труды конференции «Актуальные проблемы морской энергетики». №68/69 (2022).
10. Dobrodeev A.A. Refinement of approaches to estimation of ship ice resistance in ice channel based on data from physical model experiments// Proceedings of the 37th International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering (OMAE17). Madrid, 2018

References

1. Glebko Yu.V., Tsoy L.G., Shtrek A.A. Krupnotonnazhnye suda v Arktike: real'nost' i perspektivy [Large-tonnage vessels in the Arctic: reality and prospects] // Morskoy flot. – 2017, № 3.. Morskoy flot №3 (2017).
2. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Eksperimental'nye issledovaniya vozmozhnosti provodki ledokolom krupnotonnazhnykh sudov pri buksirovke vplotnyuyu [Experimental studies of the possibility of icebreaker leading of large-tonnage vessels when close towing]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O.Makarov. 2022; 14(5): 645–655. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-645-655.
3. Polovinkin V.N., Fomichev A.B. Problemy importozameshcheniya v otechestvennoy ekonomike [Problems of import substitution in the domestic economy]. Zh. Ekspertnyy soyuz № 2 (12), 2014 g., str. 30–33.
4. Ryzhov V.N. Trudnosti sozdaniya korabel'nykh dvigateley i perspektivy dizelestroeniya [Difficulties in creating ship engines and prospects for diesel construction]. «i-Mash (i-Mash.ru)», 2015.
5. Sazonov K.E., Dobrodeev A.A. Ledovaya khodkost' krupnotonnazhnykh sudov [Ice-going capabilities of large-tonnage vessels]. SPb., 2017.
6. Sazonov K.E. Teoreticheskie osnovy plavaniya sudov vo l'dakh [Theoretical foundations of ship navigation in ice]/ TsNII im.ak. A.N.Krylova, Sankt-Peterburg, 2010.
7. Spravochnik po teorii korablya [Handbook of Ship Theory]. V tpekh tomakh., t.1. Gidrodinamika. Soprotivlenie dvizheniyu sudov. Sudovye dvizhiteli. /Pod red. Ya.I. Voytkunskogo. - L.: Sudostroenie, 1985. 768 s.
8. Zuev V.A. Sredstva prodleniya navigatsii na vnutrennikh vodnykh putyakh [Means of prolonging navigation on inland waterways]. L.: Sudostroenie, 1986, 208 s.
9. Rodionov N.Yu. Razrabotka koeffitsienta, opredelyayushchego svyaz' mezhdu pokazatelyami ledovoy khodkosti sudna i effektivnost'yu ego energeticheskoy ustanovki [Development of a coefficient determining the relationship between the indicators of ice-going capabilities of the vessel and the efficiency of its power plant] // Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva – izbrannye trudy konferentsii «Aktual'nye problemy morskoy energetiki» [Actual problems of marine energy]. №68/69 (2022).
10. Dobrodeev A.A. Refinement of approaches to estimation of ship ice resistance in ice channel based on data from physical model experiments// Proceedings of the 37th International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering (OMAE17). Madrid, 2018

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

Алексей Алексеевич Добродеев, кандидат технических наук, доцент кафедры Океанотехники и морских технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3, заместитель начальника лаборатории-начальник сектора лаборатории ледотехники, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, e-mail: stamukha@yandex.ru

Николай Юрьевич Родионов, преподаватель кафедры Судовых энергетических установок, систем и оборудования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3, инженер лаборатории ледотехники, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, e-mail: nikolay_rodionov97@mail.ru

Георгий Алексеевич Архипов, кандидат технических наук, доцент кафедры Судовых энергетических установок, систем и оборудования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3, e-mail: arhipov.georgij@yandex.ru

Aleksei A. Dobrodeev, Ph.D. (Eng), Senior Researcher of Laboratory of ice engineering research fundamentals at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29, Assistant Professor of the Department of Ocean Engineering and Marine Technologies, State Marine Technical University, 190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya Ulitsa, 3, Deputy Ice Lab Head, Krylov State Research Centre, 196158, St. Petersburg, Moskovskoe shosse, 44, e-mail: stamukha@yandex.ru

Nikolay Yu. Rodionov, lecturer of Department of Marine power plants, State Marine Technical University, 190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya Ulitsa, 3, engineer of Ice Lab Krylov State Research Centre, 196158, St. Petersburg, Moskovskoe shosse, 44, e-mail: nikolay_rodionov97@mail.ru

Georgij A. Arhipov, Ph.D. (Eng) Assistant professor of Department of Marine power plants, State Marine Technical University, 190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya Ulitsa, 3, e-mail: arhipov.georgij@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.06.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.07.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 14.08.2023.

Научная статья

УДК 626.01; 627.22

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.044>

Новый подход к определению ледовой нагрузки на инженерные сооружения для сценария предельной кинетической энергии

А.А. Добродеев^{1,2,3} stamukha@yandex.ru, К.Е. Сазонов^{1,2,3} kirsaz@rambler.ru

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ³Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Сценарий предельной кинетической энергии часто применяется для определения уровня ледовой нагрузки на различные морские инженерные сооружения. Как правило, для определения нагрузки в соответствии с этим сценарием осуществляют расчет по формулам, содержащимся в различных нормативных документах. Экспериментальные исследования в ледовом бассейне для этой цели не используются. В работе приводятся некоторые результаты экспериментального изучения в ледовом бассейне ледовой нагрузки на морские гидротехнические сооружения, для описания которой используется сценарий предельной кинетической энергии. Подробно описана методика проведения модельных испытаний. Полученные экспериментальные данные сравниваются с результатами расчетов по нормативным документам. Выполнен анализ влияния на уровень ледовой нагрузки важнейших факторов, которые определяют кинетическую энергию льдины, а именно площади ледяного поля и скорости его дрейфа. Показано, что результаты экспериментов плохо коррелируют с расчетными данными. Проанализированы причины указанных расхождений. Выдвинуто предположение, что основной причиной расхождения является несоответствие теоретического и наблюдаемого в эксперименте механизмов локального разрушения льдины.

Ключевые слова: ледовая нагрузка, кинетическая энергия, прочность льда на сжатие, толщина льда, инженерное сооружение.

Финансирование: Работа выполнена как часть проекта «Исследование статистических закономерностей ледовых нагрузок на инженерные сооружения и разработка нового метода их вероятностного моделирования» №0784-2020-0021 при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Для цитирования: Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Новый подход к определению ледовой нагрузки на инженерные сооружения для сценария предельной кинетической энергии, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 3, С. 58—64. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.044

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.044>

A new approach to determining the ice load on marine engineering structures for the critical kinetic energy scenario

Aleksei A. Dobrodeev^{1,2,3} stamukha@yandex.ru, Kirill E. Sazonov^{1,2,3} kirsaz@rambler.ru

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, ² St. Petersburg state marine technical University, ³ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The critical kinetic energy scenario is often used to determine the level of ice load on various offshore engineering structures. As a rule, to determine the load in accordance with this scenario, calculations are carried out following formulas contained in various regulatory documents. Experimental tests in an ice basin are typically not used for this purpose. The paper shows some results of an experimental study of the ice load on marine hydro-technical structures in the ice basin. The critical kinetic energy scenario is used to interpret the results. The methodology of model tests is described in detail. The measured experimental data are compared with simulations made according to regulatory documents. The influence of the most critical factors determining an ice floe's kinetic energy on the ice load level is analyzed. These factors, in particular, include the area of the ice field and its speed. It is observed that the experimental results poorly correlate with the calculated data. The reasons for this inconsistency are analyzed. It is suggested that the main reason for the discrepancy is the difference between the theoretical and experimentally observed mechanisms of local ice floe destruction.

Key words: ice load, kinetic energy, compressive strength, ice thickness, marine engineering structure.

Financial Support: This work was carried out as part of the project "Study of statistical regularities of ice loads on engineering structures and development of a new method of their probabilistic modeling" №0784-2020-0021 supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Aleksei A. Dobrodeev, Kirill E. Sazonov, A new approach to determining the ice load on marine engineering structures for the critical kinetic energy scenario, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 3, P. 58—64. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.044

Введение

Одним из важнейших этапов организации экспериментальных исследований ледовой нагрузки на морские инженерные и гидротехнические сооружения является определение сценария ледового воздействия. Как правило, оно основано на результатах анализа ледовой обстановки, конфигурации исследуемых объектов и их взаимного расположения.

Для анализа ледовой обстановки используются результаты инженерно-гидрометеорологических изысканий. Они должны содержать в себе подробную информацию о ледообразовании в акватории строительства и эксплуатации будущего морского сооружения в зимний период, особенностях таяния и разрушения льда в летне-весеннее время. Результаты изысканий должны содержать типизацию ледовых условий акватории, т.е. преобладающие формы ледяных образований, к которым относятся сплошной ровный лед, различные формы битого льда, деформированный лед. В этих исследованиях указываются основные характеристики льда, включающие размеры ледяных полей, толщину льда, его прочностные свойства, скорость и направление дрейфа. Важным требованием к исходной гидрометеорологической информации является учет возможных сценариев взаимодействия льда с инженерным сооружением. Кроме этого данные об обеспеченности важнейших характеристик ледяного покрова должны быть соотнесены с характеристиками природных объектов [1]. Иными словами, например, если рассматривается воздействие дрейфующего поля на сооружение, то размер этого поля и скорость его дрейфа не должны приниматься максимальными, хотя такая практика, к сожалению, сейчас весьма распространена.

Немаловажной гидрологической характеристикой, используемой при моделировании в ледовом бассейне, является уровень воды, который может меняться в широком диапазоне, тем самым, оказывая существенное влияние на характер взаимодействия льда с сооружением.

К основным сценариям ледового воздействия на морские сооружения, как правило, относятся [2,3 и др.]:

- воздействие дрейфующего льда (сплошного ровного, битого и торосистого) в период становления припая (в среднем, период ноябрь – декабрь);
- навал обломков полей на сооружение;
- подвижки льда перед взломом припая и дрейф льда (ровного и крупнобитого) при максимальной толщине льда (в среднем, период апрель – июнь);
- воздействие дрейфующего мелкобитого льда и ледяной каши в течение всего зимнего периода (характерен для акваторий с интенсивным судоходством);
- нагрузки вследствие термического расширения льда.

Современные гидротехнические сооружения преимущественно строятся в замкнутых акваториях, которые могут быть отделены от воздействия различных природных явлений как искусственными защитными сооружениями, так и естественными природными барьерами. В зимний период на таких акваториях в основном образуется неподвижный

припайный лед. Взломы припая в зимний период в районе расположения морских сооружений происходят крайне редко. Однако, она может находиться под влиянием сильных ветров, что влечет за собой развитие сгонно-нагонных явлений, а затем и возникновение таких опасных ледовых явлений как дрейф и торошение льда в период его взлома и разрушения. В этом случае, определение сценария ледового воздействия для физического моделирования или расчета глобальной ледовой нагрузки на сооружение представляет огромную сложность.

Дело в том, что нагрузка, возникающая при контакте ледового поля с сооружением зависит от массы, начальной скорости и физико-механических свойств льда, формы и размеров сооружения. При взаимодействии ледового поля с сооружением, последнее внедряется в лед на некоторую заданную глубину, которая зависит от указанных выше параметров кинетической энергии поля, свойств льда, формы сооружения и т.д. В теории принято считать, что максимальная нагрузка соответствует глубине внедрения, при которой достигается максимальная номинальная площадь контакта [2].

Таким образом, традиционно при рассмотрении ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения рассматривается три сценария ее реализации: предельного напряжения, механизм которого описан выше, предельной кинетической энергии и предельной силы [2].

Сценарий предельной силы развивается, если нагрузка после остановки ледового поля не велика и сооружение не внедряется в лед. В этом случае на задней стенке льдины может начаться торошение и насаивание других фрагментов льда.

В данной работе рассматривается сценарий предельной кинетической энергии, т.к. он является одним из основных в отечественных нормативных документах, см. например, [4]. Попыток физического моделирования данного сценария для реальных морских сооружений в опытовом бассейне практически не выполнялось, поэтому изучение механизма взаимодействия льда с сооружением и разработка методики моделирования данного сценария является актуальной задачей.

Расчетные формулы для этого сценария ледовой нагрузки легко могут быть получены из уравнения баланса энергии имеющей скорость V льдины при ее остановке инженерным сооружением:

$$\frac{M'V^2}{2} = \int_0^x \sigma_{cr}(A_c) A_c(x) dx, \quad (1)$$

где M' - масса дрейфующей льдины, определенная в общем случае с учетом присоединенных масс воды; σ_{cr} - прочность льда на смятие; $A_c(x)$ - зависимость площади контакта льдины с сооружением в зависимости от глубины внедрения x .

Из уравнения (1) получают различные формулы для определения расчетного значения силы F , под которой понимают величину усилия, действующего на сооружение в конце процесса внедрения.

1. Экспериментальные исследования: методика и результаты

Эксперименты по изучению воздействия ледовой нагрузки на модель портового сооружения при остановке дрейфующей льдины проводились в ледовом бассейне Крыловского научного центра [5].

Исследования проводились с моделью швартового пала, имеющего свайное основание, которая была изготовлена в масштабе 1:17.

Методика эксперимента заключалась в следующем. На первой стадии проведения работы проводились эксперименты, в которых модель сооружения взаимодействовала с бесконечным ледяным полем (рис. 1). Нагрузка в этих экспериментах определялась сценарием предельных напряжений. Особенности изучения и анализа ледовых нагрузок для этого сценария подробно описаны в работах [6,7]. На второй стадии эксперимента изучалась нагрузка при остановке дрейфующей льдины.



Рис. 1. Воздействие ровного льда на швартовый пал под косым углом

Эксперимент выполнялся следующим образом. Модель сооружения была закреплена под буксировочной тележкой, которая оставалась неподвижной. Из неразрушенного участка моделированного льда вырезалась прямоугольная льдина заданных размеров. С помощью вспомогательной тележки эта льдина разгонялась до скорости, которая требовалась в данном эксперименте. Контакт льдины с вспомогательной тележкой прекращался менее чем за секунду до начала ее взаимодействия с моделью. После этого льдина продолжала самостоятельное движение (рис. 2).



Рис. 2. Воздействие обломка ледового поля на швартовый пал под прямым углом

Была выполнена следующая программа модельных испытаний. Модель испытывалась в одной толщине льда 0,72 м, которая соответствует наиболее тяжелым ледовым условиям. При испытаниях варьировались следующие величины: осадка модели, направление дрейфа льда по

отношению к ее фронтальной поверхности, скорость дрейфа. Осадка изменялась от максимальной, когда со льдом взаимодействует ростверк пала, до средней, при которой взаимодействие происходит с опорными сваями. Были исследованы два угла направления дрейфа: 0° (перпендикулярно фронтальной поверхности) и 60°. Скорость дрейфа варьировалась от 0,2 до 0,8 м/с. В экспериментах использовались льдины, площадь которых была равна 10000 и 22500 м² для натурных условий. При выполнении всех стадий исследования моделирование осуществлялось в соответствии с критерием подобия Фруда.

В экспериментах с помощью 6-ти компонентного динамометра проводились измерения сил и моментов, действующих на модель в целом. Кроме этого, фиксировалась ледовая нагрузка на одну из свай опорного основания, для чего был использован 5-ти компонентный динамометр. Схема эксперимента, включающая трехмерный вид модели и схему расположения динамометров представлена на рис. 3. Пересчет модельных данных на натурные условия осуществлялся в соответствии с общепринятыми критериями подобия. с критерием Фруда осуществлялся по кубу масштаба.

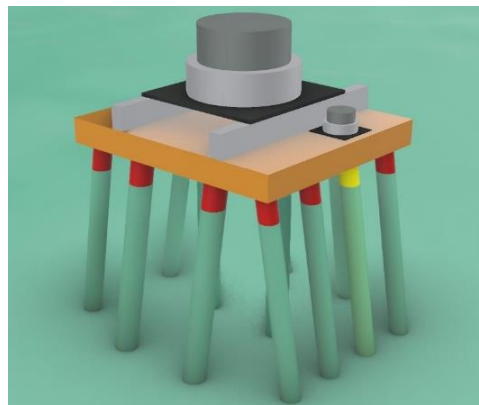


Рис. 3. Схема проведения эксперимента (желтым цветом помечена свая, на которой проводилось измерение ледовой нагрузки)

Некоторые результаты экспериментов представлены на рис.4-6.

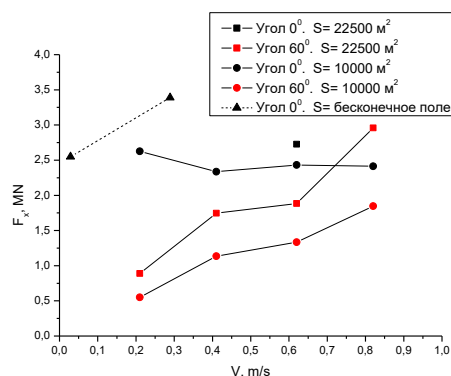


Рис. 4. Среднепиковые нагрузки на ростверк пала

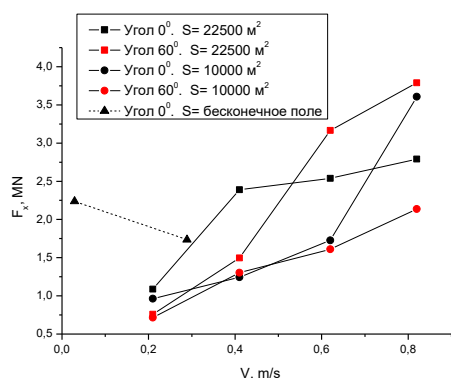


Рис. 5. Среднепиковые нагрузки на пучок свай пала

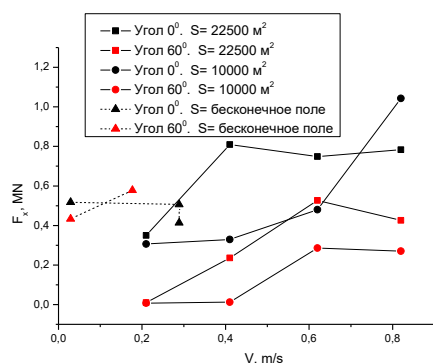


Рис. 6. Среднепиковые нагрузки на отдельную сваю пала

Приведенные результаты представляют собой ледовые среднепиковые нагрузки на сооружение. При обработке результатов модельных испытаний гидротехнических сооружений в ледовом бассейне использование усреднения пиковых значений нагрузки является стандартным приемом обработки экспериментальных данных [5]. При обработке описываемых экспериментов для анализа находились пиковые значения нагрузки, которая превышала 80-85% от максимального ее значения.

2. Обсуждение полученных результатов

Приведенные экспериментальные данные позволяют предположить наличие некоторых явных и не совсем явных закономерностей формирования ледовой нагрузки на инженерное сооружение, реализующейся по сценарию предельной кинетической энергии. Так, довольно очевидной является зависимость ледовой нагрузки на любой из рассмотренных объектов от площади (массы) останавливаемого препятствием ледяного поля. Такая зависимость также следует из теоретических формул. В соответствии с теорией нагрузки для использованных в эксперименте полей моделированного льда должны отличаться в 1.5 раза. В экспериментах зарегистрированы значения нагрузки, которые в большую или меньшую сторону отклоняются от этого теоретического значения, но их среднее значение примерно совпадает с теорией.

Поэтому зависимость $F_x \div \sqrt{S}$ можно считать правильной и подтвержденной в модельном эксперименте.

Зависимость нагрузки от скорости льдины носит более сложный характер. Из теории следует, что ледовая нагрузка линейно зависит от скорости движения льдины. Полученные данные, в первом приближении, позволяют говорить о наличии подобной зависимости только для случая, когда угол дрейфа льда составляет 60° с фронтальной поверхностью сооружения (ростверк, куст свай), т.е. когда со льдом взаимодействует угол прямоугольного в плане объекта (именно для такого объекта выписываются уравнения в теории).

Как показывают опытные данные зависимость взаимодействия рассматриваемых объектов при угле дрейфа льда 0° и сваи при любом угле дрейфа от скорости носит более сложный характер. Необходимо отметить, что в этом случае эффективная ширина взаимодействующего объекта остается постоянной или изменяется весьма незначительно. Анализ экспериментальной информации, приведенной на рисунках, позволяют сделать предположение, что, начиная с некоторой скорости, ледовая нагрузка перестает от нее зависеть. Эта нагрузка, как показывают результаты сопоставления с данными эксперимента в бесконечном поле, примерно соответствует нагрузке, полученной при проведении эксперимента с теми же объектами в бесконечном поле. По-видимому, запаса кинетической энергии в дрейфующей льдине оказывается достаточно для реализации сценария предельного напряжения [2].

При рассмотрении влияния скорости дрейфа льда на величину ледовых нагрузок на инженерное сооружение при остановке льдины нельзя исключать влияние особенностей принятой методики проведения эксперимента. В соответствии с этой методикой перед началом взаимодействия с моделью льдина движется по инерции. Начиная с этого момента, на нее действует сила сопротивления воды, которая в эксперименте не регистрируется. Сила сопротивления воды является тормозящей и, в принципе, уменьшает величину воспринимаемой динамометром нагрузки. В морской ледотехнике обычно считается, что по сравнению с ледовыми нагрузками гидродинамические силы малы, поэтому ими часто можно пренебречь [8,9]. Можно предполагать, что и в рассматриваемом случае влияние гидродинамических сил мало, тем не менее, этот вопрос требует отдельного рассмотрения, особенно с учетом возможного проявления масштабного эффекта [10].

В теории считается, что предельное значение силы достигается в конце процесса внедрения льдины в твердое тело. Эти же положения приняты в СП 38.13330.2018 [4]. Такой вывод следует из расчетной схемы, в которой принимается, что площадь контакта льдины с сооружением постоянно увеличивается, а эффективное давление льда остается постоянным. Результаты проведенных экспериментов показывают, что данная схема плохо соответствует действительности.

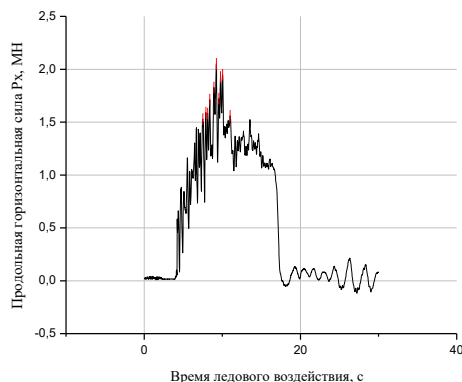


Рис. 7. Среднепиковые нагрузки на ростверк пала. Площадь ледяного поля 22500 м², скорость дрейфа льда 0,1 м/с, угол между скоростью дрейфа и фронтальной поверхностью пала 60°.

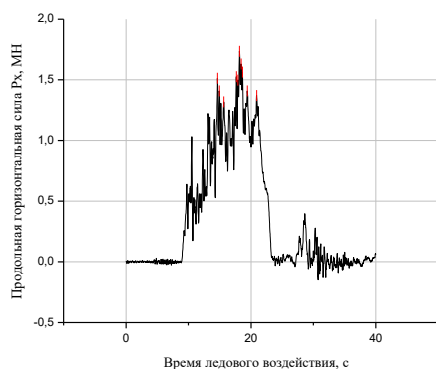


Рис. 8. Среднепиковые нагрузки на пучек свай пала. Площадь ледяного поля 22500 м², скорость дрейфа льда 0,1 м/с, угол между скоростью дрейфа и фронтальной поверхностью пала 60°.

На рисунках 7 – 9 представлены экспериментально полученные зависимости ледовой нагрузки от времени процесса. Эти зависимости приведены для нагрузки на ростверк пала, на пучек свай и отдельную сваю для одних и тех же параметров, характеризующих движение ледяного поля.

Как следует из рисунка 7, начальная стадия процесса взаимодействия ростверка пала с тормозящейся льдиной в целом соответствует теоретическому описанию. Однако примерно в середине этого процесса происходит, по-видимому, локальное разрушение внедряющейся льдины, которое приводит к резкому снижению ледовой нагрузки во второй половине процесса внедрения.

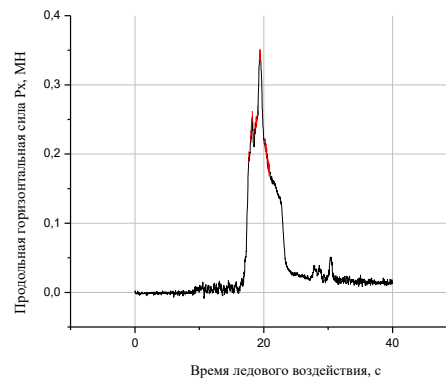


Рис. 9. Среднепиковые нагрузки на отдельную сваю пала. Площадь ледяного поля 22500 м², скорость дрейфа льда 0,1 м/с, угол между скоростью дрейфа и фронтальной поверхностью пала 60°.

Процесс взаимодействия пучка свай в какой-то мере повторяет описанный выше характер взаимодействия (рис.8). Отличие заключается в том, что локальное разрушение льдины, приводящее к снижению ледовой нагрузки, происходит несколько позже. Отметим, что в данном случае речь идет о глобальной ледовой нагрузке на пал. Поэтому наблюдаемое отклонение можно объяснить особенностями взаимодействия со льдом ряда свай. Можно предположить, что прежде, чем произойдет локальное разрушение льдины, влияющее на взаимодействие со льдом всего пучка, происходят локальные разрушения в окрестностях отдельных свай. Об этом в какой-то мере свидетельствует наличие на графике трех последовательно расположенных пиков, после которых наблюдается сброс ледовой нагрузки.

Взаимодействие отдельной сваи (рис.9) со льдом в наибольшей степени соответствует теоретическому описанию. Но, и в этом случае наблюдается сброс ледовой нагрузки, свидетельствующий о локальном разрушении ледяного покрова.

В таблице, приведены результаты измерений продолжительности контакта льдины с сооружением t_c , а также указано в какой момент во время контакта была зафиксирована максимальная нагрузка (значение коэффициента k в соотношении kt_c).

Анализ таблицы показывает, что только в трех измерениях положение максимума усилия соответствовало примерному окончанию процесса внедрения (выделены в таблице цветом). В большинстве случаев он располагался в середине процесса, реже в самом его начале. Можно констатировать, что теоретическая расчетная схема не совсем верно описывает происходящие при торможении льдины физические явления.

Таблица 1
Относительная временная координата положения максимума нагрузки при соударении льдины с швартовым палом

V, м/с	S, тыс. м ²	Угол, град	Ростверк	Куст свай	Отдельная свая
0,2	22,5	0	-	0,49	0,48
		60	0,65	0,22	0,39
	10,0	0	0,59	0,87	0,89
		60	0,46	0,46	0,43
0,4	22,5	0	-	0,38	0,27
		60	0,39	0,65	0,74
	10,0	0	0,04	0,24	0,25
		60	0,6	0,17	0,17
0,6	22,5	0	0,22	0,1	0,13
		60	0,51	0,61	0,72
	10,0	0	0,56	0,63	0,75
		60	0,49	0,75	0,76
0,8	22,5	0	-	0,24	0,24
		60	0,57	0,43	0,51
	10,0	0	0,1	0,2	0,17
		60	0,48	0,85	0,41

По-видимому, для более точного описания этих явлений необходимо разработать более подробную модель разрушения льда. Экспериментальные данные показывают, что характер разрушения ледяного покрова оказывает влияние на характер протекания процесса внедрения льдины в

сооружение. Ледовая сила обладает существенной изменчивостью во времени, которая зависит от характера разрушения ледяного покрова. Именно поэтому при анализе экспериментальных данных эта сила характеризуется нами не ее максимальным значением, а некоторой средней величиной – средним значением зарегистрированных в процессе пиков нагрузки.

Заключение

В работе приведены некоторые результаты экспериментальных исследований ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения, которая реализуется по сценарию максимальной кинетической энергии. В результате исследований было выявлено существенное расхождение экспериментальных зависимостей ледовой силы от принятых в теории, и вошедших в нормативные документы. Полученные результаты требуют дополнительных проверок и более детальных исследований, например, для выяснения влияния масштабного эффекта на результаты пересчета модельных данных на натурные условия. Однако, эти результаты убедительно показывают, что использование содержащихся в нормативных документах расчетных формул должно осуществляться с большой осторожностью, т.к. они не совсем адекватно описывают реально происходящие процессы.

Литература

1. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Особенности выбора сценариев ледовых условий для модельных исследований в обеспечение промышленного освоения Обской губы // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. No 1. С. 91–105. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-91-105>.
2. Løset S., Shkhinek K.N., Gudmestad O.T., Høyland K.V. Actions from Ice on Arctic Offshore and Coastal Structures, Student's Book for Institutes of Higher Education, St. Petersburg, "LAN", 2006. — 272 pp.
3. Благовидова И.Л., Тертышников А.С. Оценка глобальных ледовых нагрузок на ледостойкую стационарную платформу на месторождении Каменномыское-море // Морской вестник. 2020. No 1 (14). С. 34–37.
4. СП 38.13330.2018 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). СНИП 2.06.04-82*. Электронный ресурс: <http://docs.cntd.ru/document/553863434>
5. Сазонов К.Е. Модельный и натурный эксперимент в морской ледотехнике. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2021, 306 с.
6. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Физическое моделирование ледовой нагрузки на протяженные гидротехнические сооружения. Сооружения с вертикальной стенкой // Арктика: экология и экономика. 2020. No 4 (40). С. 77–89. doi: 10.25283/2223-4594-2020-4-77-89.17.
7. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Физическое моделирование ледовой нагрузки на протяженные гидротехнические сооружения. Откосные сооружения с наклонной гранью // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. No 1. С. 90–100. doi: 10.25283/2223-4594-2021-1-90-100.
8. Каштелян В.И., Рывлин А.Я., Фаддеев О.В., Ягодкин В.Я. Ледоколы. Л.: Судостроение, 1972, 288 с.
9. Зуев В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях. Л.: Судостроение, 1986, 208 с.
10. Справочник по теории корабля. В трех томах., т.1. Гидродинамика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. /Под ред. Я.И. Войткунского. - Л.: Судостроение, 1985. 768 с.

References

1. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. The choice of ice conditions for ice model tests to support the industrial development of the Ob' Bay. Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research. 2023, 69 (1): 19–105. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-91-105>.
2. Løset S., Shkhinek K.N., Gudmestad O.T., Høyland K.V. Actions from Ice on Arctic Offshore and Coastal Structures, Student's Book for Institutes of Higher Education, St. Petersburg, "LAN", 2006. 272 pp.
3. Blagovidova I.L., Tertyshnikova A.S. Assessment of global ice loads on an ice-resistant fixed platform at the Kamennomysskoye-Sea field. Morskoy Vestnik. Sea Herald. 2020, 1 (14): 34–37. [In Russian]
4. SP 38.13330.2018 Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and ships). SNiP 2.06.04-82*. Электронный ресурс: <http://docs.cntd.ru/document/553863434> (In Russian)
5. Sazonov K.E. The model tests and ice trials in marine engineering. SPb.: Krylov State Research Centre, 2021. 306 p. [In Russian].

6. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Physical modeling of ice load on extended hydraulic constructions. The vertical wall constructions. *Arktika: ekologiya i ekonomika. Arctic: ecology and economics*. 2020, 4 (40): 77–89. doi: 10.25283/2223-4594-2020-4-77-89 [In Russian].
7. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Physical modeling of ice load on extended hydraulic constructions. Sloping constructions with an inclined edge. *Arktika: ekologiya i ekonomika. Arctic: ecology and economics*. 2021, 11 (1): 90–100. doi: 10.25283/2223-4594-2021-1-90-100. [In Russian].
8. Kashtelyan V.I., Ryvlin A.Ya., Fadeev O.V., 1968, Icebreakers, Sudostroenie, Leningrad, 288 pp. [In Russian].
9. Zuev V.A., 1986, Means for extending in-land water navigation period, Sudostroenie, Leningrad, 208 pp. [In Russian].
10. Handbook of ship theory. In three volumes., v.1. Hydrodynamics. Resistance to the movement of ships. Ship movers. Edited by Voytkunsky Ya.I.. Sudostroenie, Leningrad, 1985. 768 p. [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

Алексей Алексеевич Добродеев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Лаборатории фундаментальных основ ледотехнических исследований, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, доцент кафедры Океанотехники и морских технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, д. 3, заместитель начальника лаборатории-начальник сектора лаборатории ледотехники, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, e-mail: stamukha@yandex.ru

Aleksei A. Dobrodeev, Ph.D. (Eng), Senior Researcher of Laboratory of ice engineering research fundamentals at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29, Assistant Professor of the Department of Ocean Engineering and Marine Technologies, State Marine Technical University, 190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya Ulitsa, 3, Deputy Ice Lab Head, Krylov State Research Centre, 196158, St. Petersburg, Moskovskoe shosse, 44, e-mail: stamukha@yandex.ru

Кирилл Евгеньевич Сазонов, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории фундаментальных основ ледотехнических исследований, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, профессор кафедры Океанотехники и морских технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, д. 3, начальник лаборатории ледотехники, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, e-mail: kirsaz@rambler.ru

Kirill E. Sazonov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Leading Researcher of Laboratory of ice engineering research fundamentals at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29, Professor of the Department of Ocean Engineering and Marine Technologies, State Marine Technical University, 190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya Ulitsa, 3, Ice Lab Head, Krylov State Research Centre, 196158, St. Petersburg, Moskovskoe shosse, 44, e-mail: kirsaz@rambler.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.06.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 02.08.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 15.08.2023.

Научная статья

УДК 629.124

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.045>**К вопросу об определении сопротивления разрушения льда платформами на воздушной подушке**Н.М. Семенова¹ ShaNaMix@yandex.ru, Ю.А. Двойченко¹ edbas2@yandex.ru¹Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация Низкие скорости, высокие давления и несамоходность являются отличительными особенностями ледокольных платформ на воздушной подушке. Исследованию взаимодействия платформ со сплошным ледяным покровом посвящены небольшое количество работ. В статье рассматриваются различные методики расчета составляющих сопротивления, приводится графический анализ сравнения с данными натурных испытаний. В основе настоящего исследования лежит принцип разделения сопротивления на составляющие, каждая из которых рассматривалась отдельно. Для уточнения формулы составляющей сопротивления были проведены модельные эксперименты. Объем исследований позволил получить эмпирическую формулу расчета сопротивления в чистой воде с требуемой надежностью и точностью. При исследовании составляющей сопротивления разрушения ледяного покрова рассматривалось сопротивление надвижению поля давления произвольной формы на основание произвольного рельефа. Считалось, что кромки такого купола опираются на основание без трещин. Численное решение задачи позволило предложить зависимость для расчета сопротивления разрушения. Окончательно, после уточнения всех составляющих, предложена зависимость расчета сопротивления в сплошном ледяном покрове и представлены графики сравнения с натурными данными.

Ключевые слова: ледокольная платформа на воздушной подушке, разрушение льда, сплошной лед, прогнозирование сопротивления, ледовые условия

Для цитирования: Семенова Н.М., Двойченко Ю.А. К вопросу об определении сопротивления разрушения льда платформами на воздушной подушке, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 3, С. 65—70. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.045

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.045>**On the issue of determining the ice failure resistance by air cushion platforms**Natalya M. Semenova¹ ShaNaMix@yandex.ru, Yuri A. Dvoichenko¹ edbas2@yandex.ru¹Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. Low speeds, high pressures and non-self-propelled are the distinctive features of icebreaking air cushion platforms. A small number of works have been devoted to the study of the platforms interaction with solid ice cover. In the article, various methods of calculating the resistance components, a graphical analysis of comparison with the data of full-scale tests are considered. The study is based on the principle of resistance separation into components, each of which was considered separately. To clarify the resistance component formula, model experiments were carried out. The volume of research has allowed to obtain the empirical formula for calculating resistance in clear water with the required reliability and accuracy. In the study of the resistance component to the ice cover failure, the resistance to the movement of an arbitrary pressure field on the base of an arbitrary relief was considered. It was believed that the edges of such a dome rest on the base without cracks. The numerical problem solution allowed to propose a dependence for calculating the fracture resistance. Finally, after clarifying all the components, the dependence of the calculation of resistance in a solid ice cover is proposed and comparison graphs with full-scale data are presented.

Key words: icebreaking air cushion platform, ice failure, ice cover, forecasting resistance, ice conditions

For citation: Natalya M. Semenova, Yuri A. Dvoichenko, Issue of determining the ice failure resistance by air cushion platforms, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 3, P. 65—70. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.045

Введение

В настоящее время стратегическое развитие Арктики включает в себя освоение богатых ресурсов региона, главным образом нефти и газа, улучшения условий жизни населения. Значимую роль отводят и долгосрочным перспективам развития Северного морского пути, как важной глобальной судоходной артерии России. В связи с этим особое внимание уделяется не только транспортным судам ледового плавания, но и ледокольному флоту, а значит вопрос продления навигации остается актуальным.

Наряду с работой традиционных ледоколов, представляется интерес использования и иных средств разрушения ледяного покрова, одним из которых являются суда на воздушной подушке (СВП). СВП могут разрушать лед двумя известными способами: при движении с резонансной скоростью и давлением. В последнем случае применяются несамоходные платформы на воздушной подушке, которые при высоком давлении и низкой скорости позволяют разрушать лед толщиной до 1 м, что эффективнее, чем традиционные ледоколы [1].

1. Постановка задачи

Относительно недавние исследования [2, 3, 4, 5, 6] акцентируются на СВП, работающих на достаточно высоких скоростях (числа Фруда Fr_L более 0.25).

Кафедра «Кораблестроение и авиационная техника» Нижегородского Государственного Технического Университета им. Р.Е. Алексеева является родоначальницей в изучении вопросов разрушения ледяного покрова с помощью ледокольных платформ на воздушной подушке (ЛПВП). Начиная с 80-х годов прошлого столетия, ведутся исследования, позволяющие спрогнозировать сопротивление платформ. К настоящему времени известны различные методики расчета составляющих сопротивления [7, 8, 9, 10].

В основе каждой из рассматриваемых методик лежит принцип разделения сопротивления на составляющие, поэтому в общем виде формулу

взаимодействия ЛПВП со сплошным ледяным полем можно записать в общем виде:

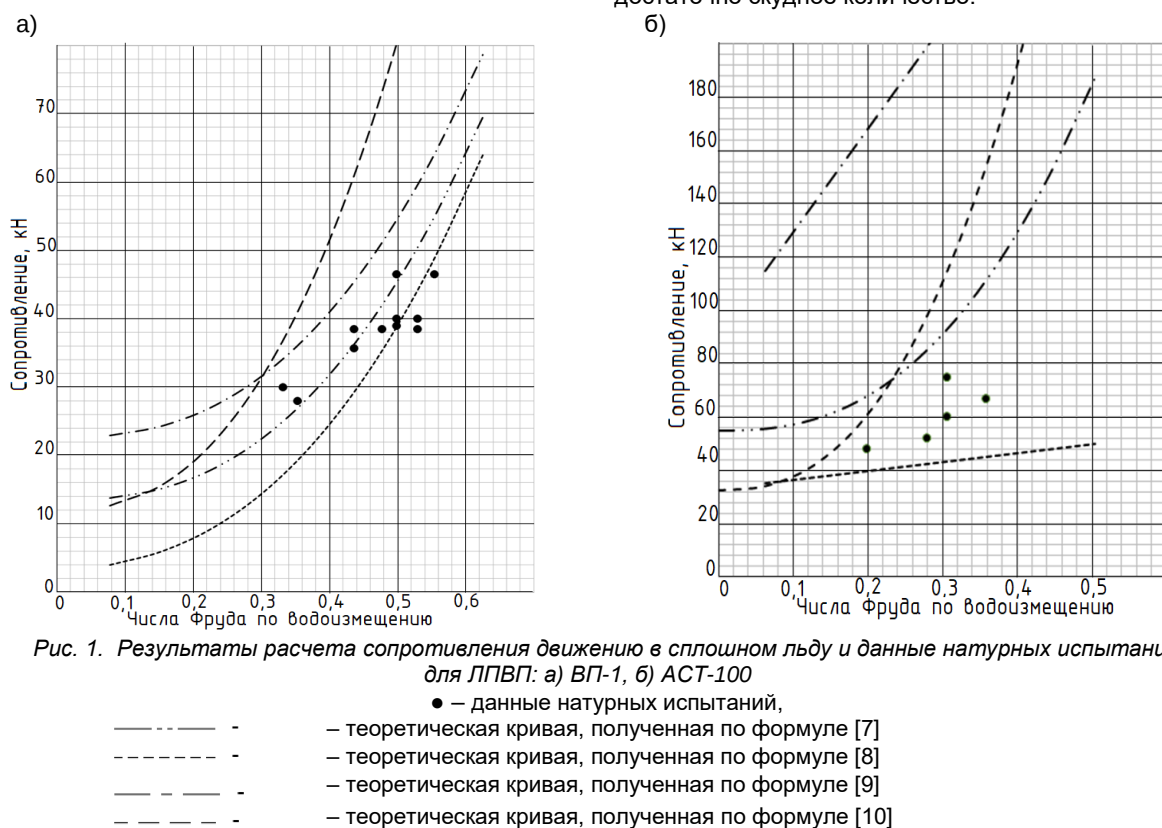
$$R = R_p + R_{тр} + R_{гд} + R_{обл} + R_{эд} \quad (1)$$

где R_p – сопротивление разрушения, $R_{тр}$ – сопротивление трения, $R_{гд}$ – гидродинамическое сопротивление, $R_{обл}$ – сопротивление обломков.

Особенностью некоторых разработанных ранее формул является, с одной стороны, разбивка сопротивлений на составляющие, а с другой – объединение в одну компоненту сопротивлений обломков и гидродинамического.

На рис.1 представлен график сравнения сопротивления в сплошном льду по известным формулам и данные натурных испытаний.

Анализ графиков сравнения показывает, что формулы дают достаточно большой разброс в данных и не всегда коррелируются с данными натурных испытаний, которых, стоит заметить, достаточно скудное количество.



2. Получение основных зависимостей

Для уточнения формулы составляющих сопротивления ледокольных платформ на воздушной подушке в опытовом бассейне НГТУ на базе кафедры «КиАТ» были проведены испытания моделей платформы (рис.2), вид в плане которых представлен на рис.3.



Рис. 2. Фрагмент испытания ЛПВП в чистой воде

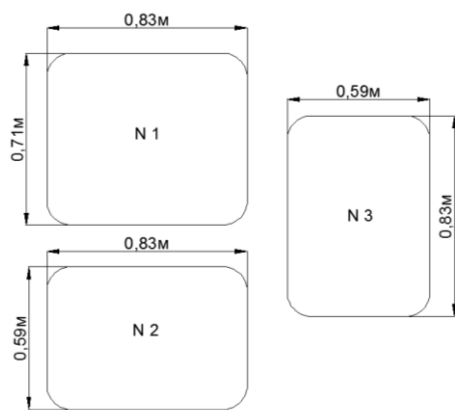


Рис. 3. Вид в плане моделей ЛПВП

По результатам полномасштабных экспериментов [11] была предложена формула расчета сопротивления ЛПВП в чистой воде, показавшую хорошую сходимость с данными натурных испытаний:

при безразмерном расходе $0,0007 \leq \bar{q} \leq 0,0013$

$$R = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{возд}}{\rho_{вода}}} \cdot (6,4 \cdot Fr_V^{2,5}) \cdot \left(0,07 \cdot \left(\bar{q}\right)^{-0,41}\right) \cdot \left(\frac{L}{B}\right)^{-0,31} \cdot \left(\frac{1,05}{\left(\frac{H_6}{h_{еп}}\right)^{1,6}} + 1\right) \cdot m \cdot g \quad (2)$$

при безразмерном расходе $0,0022 \leq \bar{q} \leq 0,0036$

$$R = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{возд}}{\rho_{вода}}} \cdot (6,4 \cdot Fr_V^{2,5}) \cdot \left(\left(\frac{L}{B}\right)^{-0,31}\right) \cdot \left(\frac{1,05}{\left(\frac{H_6}{h_{еп}}\right)^{1,6}} + 1\right) \cdot m \cdot g \quad (3)$$

При исследовании сопротивления разрушения рассматривалась схема взаимодействия ЛПВП на сплошной ледяной покров [12], представленная на рис. 4.

Задача была сформулирована следующим образом: бесконечная тонкая пластина толщиной h с

вырезом в форме канала покоится на упругом основании винклеровского типа. На пластине распределена нагрузка интенсивность $R_{вп}$, которая с трех сторон ограничена прямоугольным контуром, длиной и шириной.

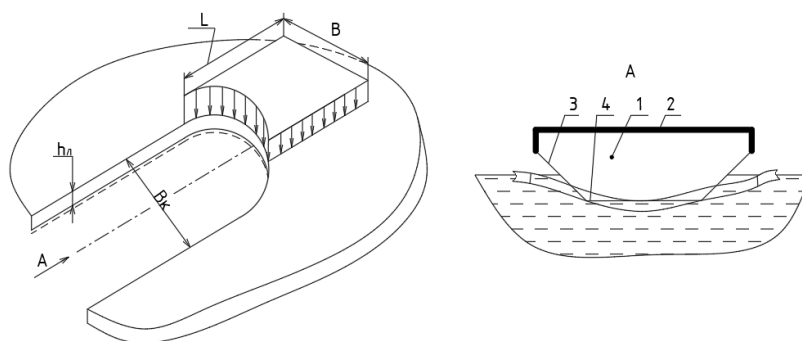


Рис. 4. Схема взаимодействия ЛПВП со сплошным льдом. Нагрузка на ледяную пластину и прогиб кромки льда (вид А), препятствующий проникновению воздуха под ледяной покров:

1 – подкупольное пространство ЛПВП; 2 – жесткий корпус; 3 – гибкое ограждение ЛПВП; 4 – уровень воды во впадине под ЛПВП

Давление в воздушной подушке, необходимое для разрушения ледяного покрова толщиной h определялось по формуле:

$$R_{вп} = \frac{\sigma_i^*}{\sigma_{imax}} \cdot \frac{\rho_{в} g l^2}{E h_{л}}, \quad (4)$$

где $\sigma_i^* = 4,9 \text{ МПа}$ – эмпирическая константа, характеристика прочности льда, $\rho_{в}$ – плотность воды, g – ускорение свободного падения, l – характерный

линейный размер, E – модуль упругости ледяного покрова, σ_{imax} – безразмерная функция максимального напряжения во льду, зависящая от безразмерных длины и ширины ВП, $h_{л}$ – толщина льда.

Величина прогиба под бортом ЛПВП в момент разрушения рассчитана с учетом увеличенной податливости ледяного покрова из-за трещин,

возникающих в процессе разрушения и определяется по формуле:

$$\omega_H = \frac{\omega_H P_{вп}}{\rho_e g} \quad (5)$$

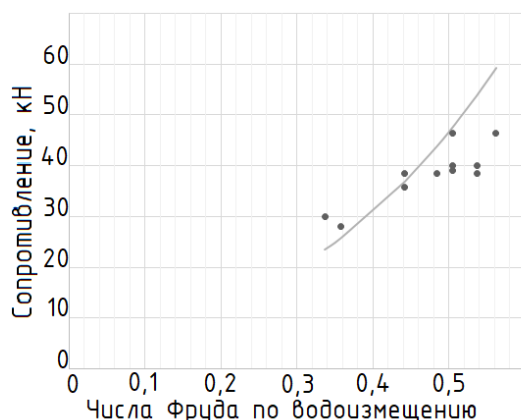
ω_H – безразмерный прогиб под бортом ЛПВП, который зависит от безразмерной длины и ширины ВП.

При выводе зависимости для сопротивления разрушения рассматривалось сопротивление надвиганию поля давления произвольной формы на основание произвольного рельефа. Кромки такого купола опираются на основание без трещин. Тогда горизонтальная составляющая равнодействующей сил давления воздуха под куполом не зависит от формы купола и основания и для плоского случая определяется разностью аппликат точек опирания купола, умноженной на величину давления.

В результате учитывается, что на кормовую часть купола действует давление воды, а на носовую – аппликата примыкания купола ко льду уменьшается за счет прогиба льда и может быть увеличена за счет слоя снега толщиной $h_{сн}$. Исходя из вышеперечисленного формула сопротивления разрушения примет следующий вид:

$$R_p = \frac{P_{вп}^2}{\rho_e g} B \left(\frac{1}{2} + \frac{0.1h_{л} + h_{сн}}{h_{вп}} - \frac{2}{B} \int_0^{B/2} \omega_H dy \right) \quad (6)$$

а)



б)

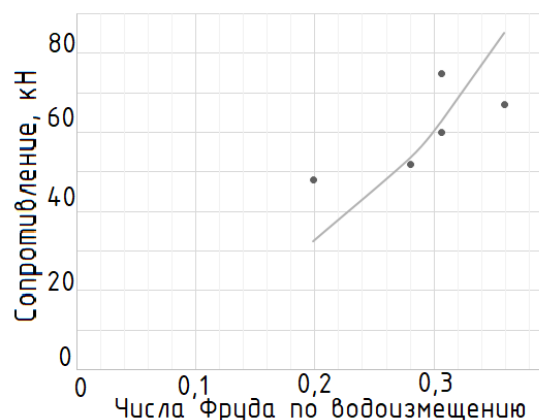


Рис. 5. Результирующие кривые сравнения данных натурных испытаний с предложенной формулой расчета полного сопротивления при движении в сплошных льдах:

а) ВП-1, б) АСТ-100

● – данные натурных испытаний

— – предлагаемая теоретическая зависимость

Заключение

Предлагаемая формула расчета составляющих сопротивления при движении в сплошном ледяном покрове дает неплохую сходимость с натурными данными, а, следовательно, может быть

Интеграл в скобках берется по прогибам под носовой кромкой ГО и определяется численно в безразмерном виде.

Сопротивление обломков льда определяется взаимодействием обломков только на кормовой поверхности гибкого ограждения и затрагивает частично его длину, а также может быть выражена в виде формулы:

$$R_{обл} = f \left(\frac{\rho - \rho_{л}}{\rho} \right)^2 h^2 (2kL_{ВП} + B_{ВП}) g \quad (7)$$

Однако расчеты показали, что сопротивление обломков сравнительно невелико, поэтому в первом приближении его можно учесть в составляющей сопротивления трения, считая, что ледяной покров взаимодействует по всей поверхности гибкого ограждения.

Составляющая трения определяется в предположении, что гибкое ограждение смято и прижато давлением воздуха к поверхности еще неразрушенного льда и выражается известной формулой:

$$R_{тр} = 1,1 f \frac{\rho_{ВП}^2 \cdot B_{ВП}}{\rho_e g \sin \gamma} \quad (8)$$

По итогам исследования были найдены составляющие сопротивления при движении в сплошных льдах, а также построены графики сравнения с натурными данными. На рис. 5 представлены результирующие кривые для платформы ВП-1 и АСТ-100.

использована для дальнейших расчетов при прогнозировании сопротивления ледокольных платформ на воздушной подушке и выбора главных размеров платформ.

Литература

1. Dvoichenko Y. A., Semenova N. M. The Influence of the Area Size and the Method of Transverse Load Application to the Ice Cover Surface on the Ice Failure Efficiency // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1079. – №. 7. – С. 072020.

2. Pogorelova, A.V., 2012. Effect of bottom slope on the wave resistance of an air-cushion vehicle in unsteady motion over an ice sheet. Proceedings of the twenty-second (2012) international offshore and polar engineering conference, pp:1393-1397
3. Day, A. H., Clelland, D., Doctors, L.J., Beveridge, P. 2010. Resistance of a compartmented surface-effect ship. Journal of ship production and design, Vol. 26, No. 3, pp. 219–230.
4. Pogorelova, AV, 2008 Wave resistance of an air-cushion vehicle in unsteady motion over an ice sheet, J. Appl.Mech. Tech. Phys., 49(1), pp. 71–79
5. Phan, A. T., 2016. A Study on Hovercraft Resistance Using Numerical Modeling, Applied Mechanics and Materials, Vol. 842, pp. 186-190.
6. Liang, Y., Alan B., Theory and Design of Air Cushion Craft, ISBN 0 340 67650 7, John Wiley& Sons Inc., New York, Toronto, 2000.
7. Зуев В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях. – Л.: Судостроение, 1986г.
8. Зуев В.А. Подготовка исходной информации при формировании математической модели проектирования ледокольных платформ на воздушной подушке// Вопросы проектирования судов, плавающих во льдах: Межвуз.сб./ Горьков. политех. ин-т, Горький, 1988г.
9. Зуев В.А. Математические модели взаимодействия судов на воздушной подушке с ледяным покровом./Проектирование средств продления навигации/ Горьков. политех. ин-т, Горький, 1986г.
10. Зуев В.А., Козин В.М. Использование судов на воздушной подушке для разрушения ледяного покрова. – Владивосток: Изд-во Дальневост. Универ-та, 1988.
11. Зуев В.А., Семенова Н.М. Модельные испытания ледокольных платформ на воздушной подушке на тихой воде. – «Журнал университета водных коммуникаций». – СПб.: СПГУВК, 2012, (Вып. 1). – 125-132с
12. Двойченко Ю.А. Численная модель разрушения ледяного покрова при движении СВП с низкой скоростью//Вопросы теории, прочности и проектирования судов, плавающих во льдах: Межвуз. Сб. – Горький, 1984 С. 81-88.

References

1. Dvoichenko Y. A., Semenova N. M. The Influence of the Area Size and the Method of Transverse Load Application to the Ice Cover Surface on the Ice Failure Efficiency. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2021. T. 1079. №. 7. C. 072020.
2. Pogorelova, A.V., 2012. Effect of bottom slope on the wave resistance of an air-cushion vehicle in unsteady motion over an ice sheet. Proceedings of the twenty-second (2012) international offshore and polar engineering conference, pp:1393-1397
3. Day, A. H., Clelland, D., Doctors, L.J., Beveridge, P. 2010. Resistance of a compartmented surface-effect ship. Journal of ship production and design, Vol. 26, No. 3, pp. 219–230.
4. Pogorelova, AV, 2008 Wave resistance of an air-cushion vehicle in unsteady motion over an ice sheet, J. Appl.Mech. Tech. Phys., 49(1), pp. 71–79
5. Phan, A. T., 2016. A Study on Hovercraft Resistance Using Numerical Modeling, Applied Mechanics and Materials, Vol. 842, pp. 186-190.
6. Liang, Y., Alan B., Theory and Design of Air Cushion Craft, ISBN 0 340 67650 7, John Wiley& Sons Inc., New York, Toronto, 2000.
7. Zuev V.A. Sredstva prodleniya navigacii na vnutrennih vodnyh putjah [Means of the Extending Navigation on the Inland Waterways]. – L.: Sudostroenie, 1986.
8. Zuev V.A. Podgotovka ishodnoj informacii pri formirovanii matematicheskoy modeli proektirovaniya ledokol'nyh platform na vozduшной podushke [Preparation of initial information in the mathematical model formation for the icebreaking air cushion platforms design]. Voprosy proektirovaniya sudov, plavajushhih vo l'dah: Mezhvuz.sb./ Gor'kov. polithn. in-t, Gor'kij, 1988 g.
9. Zuev V.A. Matematicheskie modeli vzaimodejstviya sudov na vozduшной podushke s ledjanym pokrovom [Mathematical models of air cushion vehicles interaction with ice cover]. Proektirovanie sredstv prodleniya navigacii. Gor'kov. polithn. in-t, Gor'kij, 1986.
10. Zuev V.A., Kozin V.M. Ispol'zovanie sudov na vozduшной podushke dlja razrushenija ledjanogo pokrova [Using air cushion vehicle for ice cover failure]. Vladivostok: Izd-vo Dal'nevost. Univer-ta, 1988
11. Zuev V.A., Semenova N.M. Model'nye ispytaniya ledokol'nyh platform na vozduшной podushke na tihoj vode [Model tests of icebreaking air cushion platforms on still water]. «Zhurnal universiteta vodnyh kommunikacij». SPb.: SPGU VK, 2012, (Vyp. 1). 125-132s
12. Dvoichenko Y. A. Chislennaja model' razrushenija ledjanogo pokrova pri dvizhenii SVP s nizkoj skorost'ju [Numerical model of ice cover failure when the ACV moves at a low speed]. Voprosy teorii, prochnosti i proektirovaniya sudov, plavajushhih vo l'dah: Mezhvuz. Sb. Gor'kij, 1984 S. 81-88.

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

Наталья Михайловна Семенова, старший преподаватель кафедры кораблестроения и авиационной техники, Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: ShaNaMix@yandex.ru

Natalya M. Semenova, senior lecturer of the Department of shipbuilding and aviation technology, Nizhny Novgorod state technical University n.a. R.E.Alekseev, Minina, 24, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: ShaNaMix@yandex.ru

Юрий Александрович Двойченко, кандидат технических наук, доцент кафедры кораблестроения и авиационной техники, Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: edbas2@yandex.ru

Yuri A. Dvoichenko, Ph.D. (Eng), Assistant professor of the Department of shipbuilding and aviation technology, Nizhny Novgorod state technical University n.a. R.E.Alekseev, Minina, 24, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: edbas2@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.06.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 02.08.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 15.08.2023.

Научная статья

УДК 629.124

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.046>**Экспериментальное исследование ледового сопротивления модели ледокола проекта 21900 в опытовом бассейне****К.Д. Блинов**¹ blinov.kirill@yandex.ru, **А.Г. Ларин**¹ alexander_ks1@mail.ru, **М.А. Панченко**¹ maxp4nchenko@yandex.ru, **М.А. Панакушин**¹ panakushin921@yandex.ru¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Самым достоверным способом определения ледопроеходимости судов является натурный эксперимент, однако он является очень дорогостоящим. Для проведения таких экспериментов необходимо выводить из эксплуатации действующий флот. Поэтому актуальными исследованиями ледовой ходкости является модельный эксперимент. Статья посвящена физическому моделированию движения ледокола проекта 21900 в опытовом ледовом бассейне с естественным охлаждением. В качестве модели льда в экспериментах используется тонкий лёд естественной наморозки. Описана методика пересчета с модели на натуру параметров движения ледокола с разделением сопротивления судна на составляющие. Рассмотрена упрощенная методика пересчета на натуру с модельного эксперимента. В статье представлено техническое оснащение, необходимое для проведения экспериментов, изложена технология проведения опытов в бассейне. Приведены результаты опытов по буксировке модели ледокола в опытовом бассейне, получены зависимости сопротивления от скорости движения, пересчитанные на натурное судно. Проведено сравнение прогнозируемой в эксперименте ледопроеходимости с натурными испытаниями ледоколов проектов 21900 и 21900М. В результате которого выявлена хорошая сходимость результатов эксперимента с натурными данными при толщинах льда близких к предельным.

Ключевые слова: лёд, ледокол, физическое моделирование, модель льда, ледовый бассейн, теория подобия, опытовый бассейн

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФН в рамках научного проекта № 22-19-00376 «Экспериментально-теоретическое исследование полуэмпирических моделей взаимодействия судов со льдом»

Для цитирования: Блинов К.Д., Ларин А.Г., Панченко М.А., Панакушин М.А. Экспериментальные исследования сопротивления ледокола проекта 21900 в опытовом бассейне, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 3, С. 71—76. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.046

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.046>**Experimental study of ice resistance of the icebreaker model of project 21900 in the towing tank****Kirill D. Blinov**¹ blinov.kirill@yandex.ru, **Alexander G. Larin**¹ alexander_ks1@mail.ru, **Maxim A. Panchenko**¹ maxp4nchenko@yandex.ru, **Matvey A. Panakushin**¹ panakushin921@yandex.ru¹ Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Russian Federation

Abstract. The most reliable way to determine the icebreaking propulsion of ships is a full-scale experiment, but it is very expensive. To conduct such experiments, it is necessary to decommission the existing ships. Therefore, a model experiment is an actual study of ice propulsion. This paper discusses the physical modelling of the motion of the icebreaker of project 21900 in the experimental ice basin with natural cooling. Thin ice of natural freezing is used as an ice model in the experiments. The methodology of recalculation of the icebreaker motion parameters from the model-scale to the full-scale with separation of the ship resistance into its components is described. The simplified method of recalculation from a model experiment is considered here. The article presents the technical equipment necessary for carrying out experiments, describes the technology of experiments in the basin. The results of experiments a model icebreaker in the experimental basin are given, the dependences of resistance on the speed of movement, recalculated for a full-scale vessel. The comparison of the ice-crossing ability predicted in the experiment with full-scale tests of the icebreaker of projects 21900 and 21900M is carried out. As a result of which a good convergence of the experimental results with full-scale data at ice thicknesses close to the limiting ice thicknesses was revealed.

Key words: ice, icebreaker, physical modeling, ice model, ice tank, similarity theory, towing tank

Financial Support: The study was carried out with the financial support of the RFN scientific project No. 22-19-00376 "Experimental and theoretical study of semi-empirical models of the interaction ships with ice"

For citation: Kirill D. Blinov, Alexander G. Larin, Maxim A. Panchenko, Matvey A. Panakushin, Experimental studies of the icebreaker model of project 21900 in the towing basin, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 3, P. 71—76. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.046

Введение

Взаимодействие корпуса судна с ледяным покровом носит стохастический характер и на настоящий момент не существует возможности описать столь сложный процесс аналитически. Для физико-математического описания движения судна в сплошном льду в настоящий момент широко используются полуэмпирические методы [1]. Для настройки эмпирических коэффициентов, приводящих в соответствие теоретические модели с реальными объектами, необходимо проводить испытания судов.

Самым точным способом определения ледопроеходимости ледоколов и судов арктического плавания является натурный эксперимент, однако такие испытания являются очень дорогостоящими. Для проведения таких опытов необходимо выводить из эксплуатации действующий арктический флот. Данный факт делает актуальным исследование ледовой ходкости с использованием модельного эксперимента. Проведение модельных испытаний в опытовых бассейнах, также возможно на ранних стадиях проектирования судна, что дает возможность обосновать заявленные в техническом задании характеристики ходкости судна во льдах.

1. Моделирование ледяного покрова

Подход к модельным испытаниям судна в сплошных льдах основан на теоретических методах разработанных Ю.А. Шиманским [2] и Л.М. Ногидом [3], из которых вытекают требования к критериям моделирования Рейнольдса, Коши и Фруда (1) и требования к материалу модели льда (2):

$$Re = \frac{\nu L}{\nu} = idem; Ch = \frac{\rho_L \nu^2}{E} = idem; Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} = idem \quad (1)$$

$$\rho_L^H = \rho_L^M; \rho_B^H = \rho_B^M; \nu_H = \nu_M; \nu_H = \nu_M; f_H = f_M; E_H = \frac{E_M}{\lambda}; \sigma_p^H = \frac{\sigma_p^M}{\lambda}; \left(\frac{E}{\sigma_p}\right)_H = \left(\frac{E}{\sigma_p}\right)_M \quad (2)$$

где ρ_B, ρ_L – плотность воды и льда; E – модуль упругости льда; σ_p – предел прочности льда на изгиб; f – коэффициент трения льда о корпус; ν – скорость движения судна; ν – коэффициент кинематической вязкости; λ – геометрический масштаб моделирования; L – длина судна.

Одновременно выполнение условий (2) для материала модели льда (особенно для прочностных и упругих характеристик модели) сложно достижимо, поэтому адекватная модель льда до сих пор не создана.

Одним из способов представления полного сопротивления судна при движении его в сплошном льду является его разложение на составляющие:

$$R = R_p + R_{obl} + R_b, \quad (3)$$

где R – общее сопротивление судна при движении в сплошном ледяном покрове; R_p – сопротивление от разрушения сплошного льда и трения корпуса судна о неразрушенную кромку в создаваемом канале; R_{obl} – сопротивление корпуса судна от взаимодействия с обломками (притапливание,

раздвигание, трение обломков о корпус), R_b – сопротивление воды движению судна.

Модельные испытания в сплошном ледяном покрове проводятся с использованием модели льда, представляющей собой тонкий естественный лёд, намораживающийся в опытовом бассейне [4, 10].

Естественный лёд при использовании его в качестве модели льда имеет повышенную прочность на разрушение, что не позволяет использовать его в соответствии с теорией моделирования, однако опыт наших экспериментальных исследований [8, 9] показал возможность за счёт уменьшения толщины модельного льда, что также позволит уменьшить его прочность на разрушение.

Пересчет с модели на натуру производится по следующей методике:

$$\lambda_h = \frac{h_H}{h_M} = \lambda^{4/3}; R_H = \lambda^3 R_M; \nu_H = \nu_M \sqrt{\lambda} \quad (4)$$

Такой подход имеет свои минусы, такие как уменьшение сопротивления корпуса от взаимодействия с обломками в связи с несоответствия инерционных свойств обломков натурального и модельного льда.

Для решения данной проблемы несоответствия, используется экспериментальное разделение составляющих сопротивления (3) путем проведения отдельных испытаний в битом льду сплоченностью 10 баллов. Тогда пересчет на натуру для каждого из членов ведется отдельно:

$$R_p^H = \lambda^3 R_p^M; \nu_H = \nu_M \sqrt{\lambda}; h_H = \lambda^{4/3} h_M \quad (5)$$

$$R_{obl}^H = \lambda^3 R_{obl}^M; \nu_H = \nu_M \sqrt{\lambda}; h_H = \lambda h_M \quad (6)$$

Сопротивление воды в данном случае пересчитывается по традиционной методике на основании испытаний модели в чистой воде, как правило в виду её малости по сравнению с сопротивлением разрушения необходимость в этом отсутствует [4]. В данной работе пересчет сопротивления с модели на натуру ведется по упрощенной методике (4) без разделения сопротивления на составляющие.

2. Техника и технология проведения опытов

Для проведения испытаний была изготовлена модель ледокола проекта 21900 в масштабе 1:100, основные характеристики ледокола и модели представлены в табл. 1. Изображения ледокола и его модели представлены на рис. 1 и рис. 2.

Модельные эксперименты проводились в опытовом ледовом бассейне НГТУ (рис. 3), размеры которого (длина×ширина×высота) 15,6×1,65×0,85 м. Для обеспечения равномерного движения моделей в бассейне используется гравитационная система буксировки.

Скорость движения модели связана с угловой скоростью вращения ведущего шкива буксировочной системы, которая в свою очередь фиксируется с помощью фотоимпульсного датчика и регистрируется с помощью частотомера.

Модель устанавливается в бассейн, где она балластируется до нужной посадки. Груз, используемый для балластировки, фиксируется на модели. Затем модель вынимается из бассейна и взвешивается.

Таблица 1
Характеристики ледокола пр. 21900 и его модели

N/ N	Параметры	Характеристики ледокола	Характеристики модели
1.	Длина по КВЛ	114,0 м	1,14 м
2.	Ширина по КВЛ	28,02 м	0,28 м
3.	Высота борта	12,4 м	0,12 м
4.	Осадка	8,5 м	0,085 м
5.	Водоизмещение	14300 т	14,3 кг



Рис. 1. Ледокол пр. 21900 «Санкт-Петербург»



Рис. 2 Модель ледокола пр. 21900

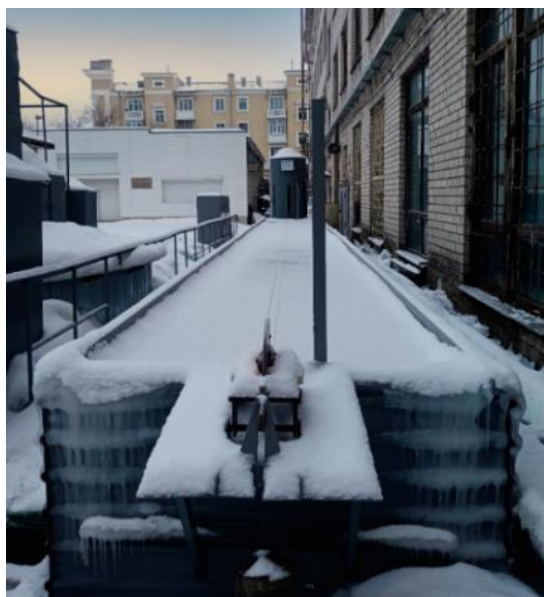


Рис. 3. Опытный ледовый бассейн НГТУ

Для измерения температуры воды в бассейне устанавливается термометр. Испытания проводятся при разных тяговых усилиях, которые остаются постоянными в течение серии испытаний с различной толщиной льда. Тяговые усилия задаются как 0,8, 0,9, 1,0 и 1,2 от тяги на швартовном режиме.

Измеряется температура воздуха, после чего проходит отведенное время, необходимое для намораживания льда нужной толщины. Контроль толщины льда проводится периодически, используя штангенциркуль, который предварительно выносят на улицу и остужают. Перед запуском модели в буксировочную систему, проводятся холостые прогоны чтобы определить сопротивление трения в системе, для этого постепенно увеличивается груз до достижения равномерного движения бесконечного троса. После того, как лед достиг нужной толщины в заданном диапазоне, модель может быть запряжена в буксировочную систему.

Подвешивается требуемый буксировочный груз, что приводит модель в движение под воздействием силы тяжести, создаваемой падающим грузом. В это время фиксируется масса буксировочного груза и скорость движения модели. Для определения сопротивления модели масса груза делится на коэффициент отношения диаметров ведущего шкива и барабана. При равномерном движении модели сила сопротивления движению будет равна силе тяги на бесконечном тросе. Результатом эксперимента являются график скорости движения модели (рис.4) и значение сопротивления на модели, зависящее от массы буксировочного груза.

Чтобы проверить равномерность движения модели, используется цифровая шкала частотомера. Если показания прибора во время движения модели остаются постоянными, то это означает, что движение идет равномерно.

После прогона модели судна в сплошном льду, проводится окончательный замер толщины льда в 5 различных точках по длине бассейна. Для этого используется штангенциркуль.

После проведения опыта в сплошном ледяном покрове производится испытание модели в поле битого льда. В рамках данных опытов необходимо получить сопротивление модели при той же скорости, которая была получена в опыте с сплошным льдом. Фрагмент эксперимента в битом и сплошном льду продемонстрирован на рис.5 и рис. 6.

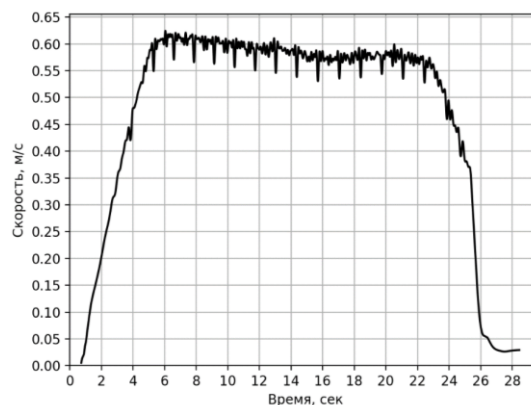


Рис. 4. График скорости движения модели в сплошном льду



Рис. 5. Испытания модели ледокола пр.21900 в сплошном льду



Рис. 6. Испытания модели ледокола пр.21900 в битом льду

3. Результаты экспериментов. Пересчет на натуру

По методике (4) производится расчёт кривых сопротивления для натурального судна, на которые наносится кривая тяги ледокола по формуле [4]:

$$P = P_{ш} \left[1 - 0,4 \left(\frac{v}{v_0} \right) - 0,6 \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \right], \quad (7)$$

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

Кривые сопротивления, пересчитанные с модели при помощи (4) приведены на рис.7.

На рис. 8 показана диаграмма ледопроеходимости полученная путем снятия с рис. 7 значений скорости и толщины в местах пересечения кривой падения тяги с кривыми сопротивления. Наличие данных натурных испытаний по ледоколам проекта 21900 и 21900М [5,6,7] даёт возможность соотнести между собой параметры, полученные во время модельного эксперимента с данными натурных испытаний судов. На рис. 8. Нанесены точки, полученные во время

испытаний ледоколов «Санкт-Петербург», «Владивосток» и «Новороссийск».

Сравнение диаграмм ледопроеходимости полученной во время натурных испытаний судов с, полученной путем эксперимента в опытовом бассейне показал высокую сходимость результатов, при толщине льда близкой к предельной. При меньших значениях толщины расхождение с натурными данными уже является более существенным.

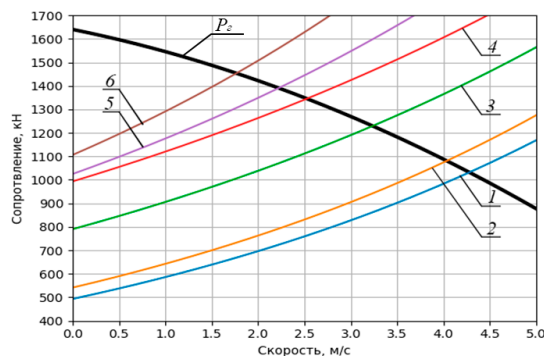


Рис. 7. Кривые сопротивления корпуса ледокола пересчитанные на натуру с модельных испытаний для толщин льда:
1 – 0,46 м; 2 – 0,70 м; 3 – 0,92 м; 4 – 1,16 м; 5 – 1,39 м; 6 – 1,62 м

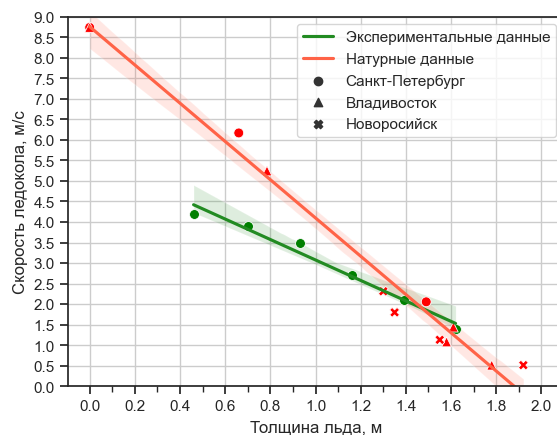


Рис. 8. Сравнение диаграмм ледопроеходимости полученных по натурным испытаниям и во время модельного эксперимента.

Закключение

Проведение испытаний моделей судов в тонком естественном льду даёт хорошую сходимость с натурными данными в самом ответственном режиме движения ледокола – в предельном сплошном льду. Полученные данные буксировочных испытаний могут быть в дальнейшем использованы для настройки коэффициентов полумпирических моделей взаимодействия судов активного плавания со сплошным ледяным покровом.

Литература

1. Грамузов, Е.М. Теоретическая модель сопротивления разрушения льда при движении ледокола в ровном сплошном ледяном поле / Е.М. Грамузов, Н.В. Калинина, А.А. Куркин // Экологические системы и приборы. 2022. № 10. С.25-35.

2. Ногид Л.М. Моделирование движения судна в сплошном ледяном поле и в битых льдах. Труды ЛКИ, вып. XXVIII. – Л. - С.179-185.
3. Шиманский Ю.А. Теория моделирования движения судна в сплошном ледяном поле. Современные вопросы ледоколостроения / Ю.А. Шиманский. – Л.: Гидрометеиздат, 1960.– 89 с.
4. Ионов, Б.П. Ледовая ходкость судов / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб. : Судостроение, 2001. – 522 с.
5. Апполонов, Е.М. Исследование ледовой ходкости ледокола «Санкт-Петербург» в Карском море / Е.М. Апполонов, В.А. Беляшов, К.Е. Сазонов, Д.С. Скрыбин, Е.В. Игошин // Судостроение. 2011 № 4 (797). С. 9-12.
6. Костылев А.И. Ледовые натурные испытания ледокола «Владивосток» / Костылев А.И., Сазонов К.Е., Тимофеев О.Я., Егiazаров Г.Е., Соловьев А.С., Егоров Д.Н., Штрамбрант В.И. // Судостроение. 2016. № 6 (829). С. 9-12.
7. Лопашев К.А. Ледовые натурные испытания ледокола «Новороссийск» в Карском море / Лопашев К.А., Сазонов К.Е., Тимофеев О.Я. // Труды Крыловского государственного научного центра, 2017, № 3 (381). С. 35-42.
8. Зуев В.А. Новые подходы к моделированию ледовой среды при модельных испытаниях судов / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016. № 4 (115). С. 107-114.
9. Семенов Д.А. Новые подходы к экспериментальным исследованиям ледового сопротивления судов на их моделях [Текст] / Семенов Д.А., Зуев В.А., Грамузов Е.М. // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 312.
10. Зуев, В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях. – Л.: Судостроение, 1986. – 206 с

References

1. Gramuzov, E.M., N.V. Kalinina, A.A. Kurkin 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. 2022. № 10. p.25-35.
2. Nogid L.M. Modelirovanie dvizheniya sudna v sploshnom ledyanom pole i v bitykh l'dakh [Simulation of ship motion in a solid ice field and in broken ice]. Trudy LKI, vyp. XXVIII. L. p.179-185.
3. Shimanskiy Yu.A. Teoriya modelirovaniya dvizheniya sudna v sploshnom ledyanom pole [The theory of modeling ship motion in a solid ice]. Sovremennye voprosy ledokolostroeniya L.: Gidrometeoizdat, 1960. 89 p.
4. Ionov B. P., Gramuzov E. M. Ledovaya hodkost' sudov [Ice propulsion of vessels]. SPb.: Sudostroenie, 2001, 512p.
5. Appolonov, V.A. Belyashov, K.E. Sazonov, D.S. Skryabin, E.V. Igoshin, Issledovanie ledovoy khodkosti ledokola «Sankt-Peterburg» v Karskom more [Investigation of ice performance of "Saint Petersburg" icebreaker in Kara sea]. Sudostroenie. 2011 № 4 (797). p. 9-12.
6. Kostylev A.I., Sazonov K.E., Timofeev O.Ja., Egiazarov G.E., Solov'ev A.S., Egorov D.N., Shtrambrant V.I Ledovye naturnye ispytaniya ledokola «Vladivostok».[Ice seakeeping trials of icebreaker "Vladivostok"] Sudostroenie. 2016. № 6 (829). p. 9-12.
7. Lopashev K.A., Sazonov K.E., Timofeev O.Ja. Ledovye naturnye ispytaniya ledokola «Novorossiysk» v Karskom more [Full-scale ice trials of Novorossiysk icebreaker in the Kara sea] Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra, 2017, № 3 (381). p 35.
8. V.A. Zuev, E.M. Gramuzov Novye podkhody k modelirovaniyu ledovoy sredy pri model'nykh ispytaniyakh sudov [New approaches to ice environment modeling in model ship tests]. Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva. 2016. № 4 (115). p 107.
9. Semenov D.A., Zuev V.A., Gramuzov E.M. Novye podkhody k eksperimental'nym issledovaniyam ledovogo soprotivleniya sudov na ikh modelyakh [New approaches to experimental investigations of ice resistance of ships on their models]. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. № 6. p 312.
10. Zuev, V.A. Sredstva prodleniya navigacii na vnutrennih vodnyh putjah [Means of extending navigation on inland waterways]. L.: Sudostroenie, 1986.p 206

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 кораблестроения и авиационная техника, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603000, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: blinov.kirill@yandex.ru

Kirill D. Blinov, graduate student of shipbuilding and aviation technology department. Nizhny Novgorod State Technical University n.a. Rostislav E.A., Minina, 24, Nizhny Novgorod, 603000, Russian Federation, e-mail: blinov.kirill@yandex.ru

Александр Геннадьевич Ларин, кандидат технических наук, доцент кафедры кораблестроение и авиационная техника, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603000, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: alexander_ks1@mail.ru

Alexander G. Larin, Ph. D (Eng), assistant professor of shipbuilding and aviation technology department. Nizhny Novgorod State Technical University n.a. Rostislav E.A., Minina, 24, Nizhny Novgorod, 603000, Russian Federation, e-mail: alexander_ks1@mail.ru

Максим Александрович Панченко, магистрант кафедры кораблестроение и авиационная техника, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603000, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: maxp4nchenko@yandex.ru

Maxim A. Panchenko, master's student of shipbuilding and aviation technology department. Nizhny Novgorod State Technical University n.a. Rostislav E.A., Minina, 24, Nizhny Novgorod, 603000, Russian Federation, e-mail: maxp4nchenko@yandex.ru

Матвей Александрович Панакушин, магистрант кафедры кораблестроение и авиационная техника, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603000, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: panakushin921@yandex.ru

Matvey A. Panakushin, master's student of shipbuilding and aviation technology department. Nizhny Novgorod State Technical University n.a. Rostislav E.A., Minina, 24, Nizhny Novgorod, 603000, Russian Federation, e-mail: panakushin921@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.07.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 21.08.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 22.08.2023.

Научная статья

УДК 532.3:532.5:629.585

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.047>**Экспериментальное определение параметров движения погруженного тела и волнообразования в ледовых условиях**В.Л. Земляк¹ vellkom@list.ru, В.М. Козин² vellkom@list.ru, А.С. Васильев¹ vasil-grunt@mail.ru¹Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, ²Институт машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН

Аннотация. В работе экспериментально рассмотрено движение погруженного тела вблизи свободной поверхности жидкости и жидкости покрытой ледяным покровом. Эксперименты проводились в опытовом ледовом бассейне. Рассмотрено влияние особенностей формы поперечного сечения тела на волнообразование и характер движения в приповерхностной водной среде. Впервые экспериментально измерена величина относительного вертикального перемещения погруженного тела возникающего под воздействием подъемной силы. Установлены зависимости между исследуемыми параметрами и скоростью движения тела, а также влияние на них ледяного покрова. 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. Делается вывод, что характер движения плохообтекаемых тел имеет сложную зависимость и большие значения относительного перемещения. По этой причине, движение подводных аппаратов с подобной формой корпуса в ледовых условиях на малом заглублении в диапазоне скоростей $0.3 < Fr < 0.39$ может оказаться не безопасным и привести к контакту их кормовой оконечности с нижней поверхностью ледяного покрова.

Ключевые слова: погруженное тело, ледяной покров, изгибно-гравитационные волны, вертикальное перемещение

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 21-19-00118

Для цитирования: Земляк В.Л., Козин В.М., Васильев А.С. Экспериментальное определение параметров движения погруженного тела и волнообразования в ледовых условиях, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 3, С. 77—87. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.047

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.047>**Experimental determination of the motion parameters of a submerged body and wave formation in ice conditions**Vitaliy L. Zemlyak¹ vellkom@list.ru, Viktor M. Kozin² vellkom@list.ru, Alexey S. Vasilyev¹ vasil-grunt@mail.ru¹Sholom-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 considers the motion of an submerged body near the free surface of a liquid and a liquid covered with an ice cover. The experiments were carried out in the experimental ice tank. The influence of the features of the shape of the cross section of the body on wave formation and the nature of motion in the near-surface aquatic environment is considered. For the first time, the magnitude of the relative vertical displacement of a submerged body arising under the influence of a lifting force has been experimentally measured. Relationships between the studied parameters and the speed of the body, as well as the influence of the ice cover on them, are established. The parameters of the generated flexural-gravity waves are determined. With the help of the proposed ice breaking criterion, their ice breaking ability is determined. A relationship has been established between the value of the ice destruction criterion and the nature of ice destruction. It is concluded that the nature of the movement of bluff bodies has a complex dependence and large values of relative displacement. For this reason, the movement of underwater vehicles with a similar hull shape in ice conditions at a shallow depth in the speed range of $0.3 < Fr < 0.39$ may not be safe and lead to contact of their aft end with the lower surface of the ice cover.

Key words: submerged body, ice cover, flexural-gravity waves, vertical displacement

Financial Support: The reported study was funded by the Russian Science Foundation, project No. 21-19-00118

For citation: Vitaliy L. Zemlyak, Viktor M. Kozin, Alexey S. Vasilyev, Experimental determination of the motion parameters of a submerged body and wave formation in ice conditions, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 3, P. 77—87. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.047

Введение

Исследования, проведенные различными авторами, показали, что движение погруженного тела в приповерхностной водной среде имеет

сложные характер и существенно зависит как от скорости его движения, так и от величины заглубления [1-5]. Известно, что силы и моменты, действующие на автономный подводный аппарат (АПА) при его движении, играют определяющую роль

в его маневренности и эксплуатационных параметрах [6]. Только наличие полных сведений о гидродинамических характеристиках устройства позволяет определить все условия, при которых возможна его безопасная эксплуатация особенно на малых заглублениях. Однако эксплуатация АПА может осуществляться не только при наличии свободной поверхности воды, но и в различных ледовых условиях. Обычно АПА лишены специализированных средств для образования майны в сплошном ледяном покрове, а их запас водоизмещения не позволяет осуществлять всплытие статическим методом в относительно толстом льду путем нагружения льда снизу за счет осушения главных балластных цистерн в случае возникновения аварийных ситуаций, либо для пополнения запаса воздуха или корректировки курса. Кроме того, известно, что для традиционного метода всплытия требуется выполнение длительных по времени маневров, что не всегда возможно в сложной ледовой обстановке. Сам процесс всплытия может быть не безопасным и привести к повреждениям легкого корпуса и выступающих частей АПА. Тем не менее, рост активности освоения арктического шельфа, повышение надежности, маневренности и скорости движения современных АПА, в том числе необитаемых показывает необходимость детального изучения влияния различных ледовых условий на характер движения погруженного тела на малом заглублении. В случае же возникновения необходимости всплытия в ледовых условиях для разрушения ледяного покрова могут быть использованы прогрессивные изгибно-гравитационные волны (ИГВ) генерируемые от движения погруженного тела на малом заглублении в системе лед-вода [7-8]. Изучение ледоразрушающей способности ИГВ в зависимости от параметров АПА и условий его движения является актуальной задачей с возможным широким спектром ее применения.

Не менее актуальным становится вопрос экспериментального исследования характера движения погруженного тела как в зависимости от ледовых условий, так и от особенностей его формы. В ряде исследований показано, что подъемная сила F_z при движении в приповерхностной водной среде имеет существенные значения и может зависеть от многих факторов [6, 9].

Целью работы было экспериментальное определение воздействия подъемной силы на характер движения погруженного тела с различной формой поперечного сечения вблизи свободной поверхности воды и воды покрытой ледяным покровом. Оценка влияния исследуемых факторов на параметры генерируемых от движения погруженного тела ИГВ.

Подготовка к проведению модельного эксперимента

Для экспериментального определения сил, действующих на погруженное тело, при его движении

в жидкости используются опытовые бассейны. Буксировка модели осуществляется с помощью буксировочной тележки, на которую крепятся одна или две вертикальные стойки. Модель может крепиться непосредственно как к самим стойкам, так и с помощью горизонтальной штанги, соединяющей стойки с ее кормовой оконечностью (рис. 1) [10]. Основным недостатком традиционного подхода к испытаниям моделей является неизбежность влияния вертикальных стоек и наличие самой штанги, отношение ее диаметра к диаметру корпуса модели и сокращение длины тела в кормовой оконечности [6]. Кроме того, с целью предотвращения рыскания модели, вся конструкция должна быть достаточно жесткой. Также такая конструкция не позволяет проводить испытания при наличии на поверхности сплошного ледяного покрова.

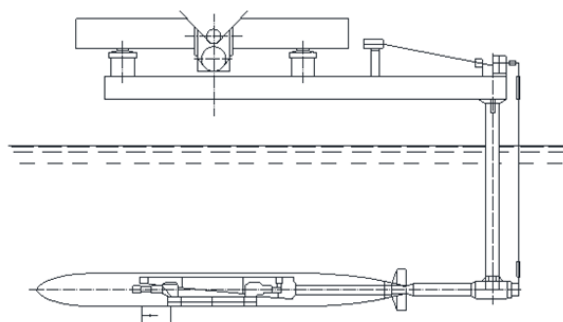


Рис. 1. Схема испытаний модели погруженного тела (Carderock Division Naval Surface Warfare Center)

Для экспериментального определения характера движения моделей погруженных тел использовался ледовый бассейн лаборатории ледотехники (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, г. Биробиджан) [11]. Характеристики бассейна соответствовали необходимым требованиям пренебрежимо малого влияния вертикальных стенок и глубины дна на исследуемые параметры и общую картину волнообразования [12], а также размерам аналогичных экспериментальных установок, на базе которых проводились схожие модельные эксперименты [10].

Небольшая длина экспериментальной установки позволила для перемещения моделей использовать тросовую буксировочную систему (рис. 2). Использование стального троса исключает влияние на картину волнообразования вертикальных стоек, соединяющих модель с буксировочной тележкой. Поскольку модель имеет нулевую плавучесть при заданном заглублении h_{sub} , то при буксировке со скоростью u_m под воздействием подъемной силы F_z появляется возможность измерить величину вертикального перемещения тела $h_m = h_{sub} + h_z$ (h_z – отклонение модели от h_{sub}), что при традиционном способе буксировки нереализуемо.

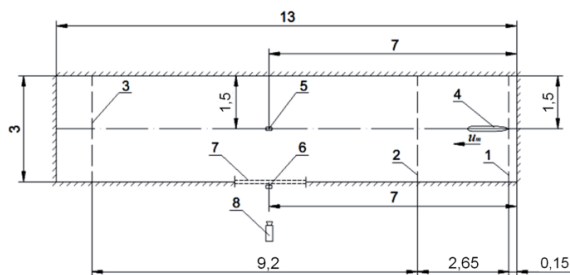


Рис. 2. Вид сверху схемы проведения эксперимента (размеры указаны в метрах)

- 1) линия начала движения модели; 2) линия окончания разгонного участка; 3) линия окончания стационарного участка движения; 4) модель; 5) датчик перемещений; 6) датчик скорости; 7) водонепроницаемое окно; 8) камера для регистрации вертикального перемещения модели

Буксировочная система была выполнена в виде двух рам, устанавливаемых по разные стороны чаши бассейна и оснащенных, подвижными блоками проводки бесконечного буксировочного троса. Для буксировки моделей использовалась необитаемая буксировочная тележка, перемещающаяся с помощью сервопривода по рельсовым направляющим.

Методика моделирования

Для моделирования ледяного покрова использовался пресноводный естественный лед без добавок. Возможность такого подхода показана в работе Ногида [13]. По сравнению с требованиями теории моделирования естественный лед имеет повышенную прочность, поэтому широкое распространение получила версия о невозможности его использования в качестве модельного. Однако при использовании естественного льда компенсировать повышенную прочность можно, уменьшив его толщину.

Моделирование осуществлялось с частичным выполнением условий подобия [14]. Модель нагрузки должна быть геометрически подобна натурному судну:

$$L_n/L_m = \lambda_l \quad (1)$$

где L_n – длина натур; L_m – длина модели; λ_l – геометрический масштаб.

Параметры генерируемых ИГВ пересчитывались на натуру согласно формуле:

$$\lambda_n/\lambda_m = w_n/w_m = \lambda_l \quad (2)$$

где λ_n – длина натуральных ИГВ; λ_m – длина модельных ИГВ; w_n – прогиб натурального льда; w_m – прогиб модельного льда.

Толщина моделируемого ледяного покрова определялась по зависимости:

$$h_n = h_m \lambda_l^{4/3} ([\sigma_u]_n / [\sigma_u]_m)^{-1/3} \quad (3)$$

где $[\sigma_u]_n$ – предел прочности натурального льда на изгиб; $[\sigma_u]_m$ – предел прочности модельного льда на изгиб.

Изгибная прочность модельного льда определялась экспериментально, испытанием консолей на плаву согласно рекомендациям работы [15].

Известно, что модуль Юнга E пресноводного льда выше модуля Юнга морского. Соотношение E/σ_u для морского и пресноводного льдов практически не отличается, соблюдение данного условия при моделировании также чрезвычайно важно [16].

В качестве критерия ледоразрушения использовался коэффициент α , показывающий зависимость разрушения льда от угла наклона ледяной пластины. В работе [8] установлено, что при движении нагрузки по льду и при движении погруженного тела подо льдом, если α превышает значение 0,04, происходит раскрытие трещин и наблюдается разрушение ледяного покрова. Так как модельные эксперименты проводились с использованием пресноводного льда, то его применение для оценки разрушения морского льда не совсем корректно. Однако прочность и трещиностойкость морского льда ниже, чем пресноводного, соответственно значение α для морского льда должно быть меньшим. Значение α определялось по зависимости:

$$\alpha = 2\pi w_m / \lambda_m \quad (4)$$

В связи со сложностью проведения экспериментов, длительности подготовки модельного поля льда и ограниченности холодного периода года (декабрь-февраль), была выполнена предварительная серия тестовых прогонов модели с целью определения оптимальных параметров эксперимента: скорости перемещения моделей; заглубления; толщины ледяного покрова. Было установлено, что наиболее значимые результаты следовало ожидать при относительном заглублении моделей $h^* = h_{sub}/H_m = 1,16$ (где H_m – высота модели), относительной скорости движения $F_r = u_m^2/gL_m = 0,3-0,77$ (где g – ускорение свободного падения) и толщине модельного льда $h_m = 2$ мм.

Параметры моделей погруженных тел

При проведении экспериментов использовались модели погруженных тел осесимметричной формы с равной длиной корпуса и длиной цилиндрической вставки. Относительное удлинение равнялось 8,4. Схемы моделей показаны на рис. 3.

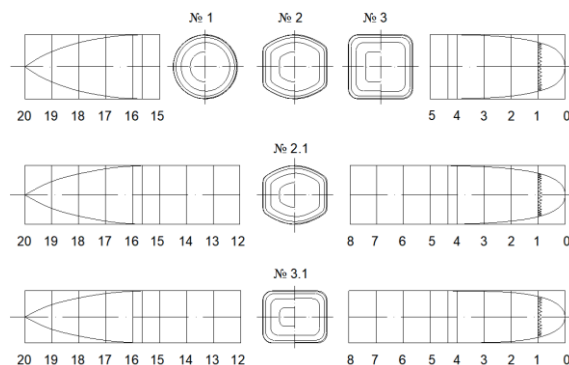


Рис. 3. Теоретические чертежи моделей погруженных тел

Модель №1 имела круговую форму поперечного сечения. Модель №2 боковые плоскопараллельные поверхности равные длине цилиндрической вставки, с верхней и нижней гранями обтекаемой формы. Модель №3 имела как боковые, так и верхнюю и нижнюю плоскопараллельную поверхность.

Значения коэффициента полноты мидель-шпангоута для моделей №1, №2, №3 равнялись $\beta_1=0,785$, $\beta_2=0,858$, $\beta_3=0,973$. Значения коэффициента продольной полноты $\varphi_1=0,857$, $\varphi_2=0,838$, $\varphi_3=0,834$. Модели №2.1 и №3.1 повторяли форму сечения моделей №2 и №3, однако имели меньшие значения H_m/B_m (где B_m – ширина корпуса модели). $H_{1-3}/B_{1-3}=1$, $H_{2.1}/B_{2.1}=0,915$, $H_{3.1}/B_{3.1}=0,813$, при $\beta_{2.1}=0,853$, $\beta_{3.1}=0,969$, $\varphi_{2.1}=0,817$, $\varphi_{3.1}=0,816$ (рис. 3).

Моделирование турбулентного режима течения в пограничном слое осуществлялось с помощью искусственных турбулизаторов в виде полос Нама. Турбулизаторы располагались на расстоянии $0,05L_m$ от носового перпендикуляра и обеспечивали достаточный уровень устойчивого турбулентного потока при минимальном увеличении сопротивления [17].

В ходе экспериментов определялись следующие параметры: прогиб модельного льда w_m ; длина λ_m и период T_m генерируемых ИГВ. Также определялась величина отклонения вертикального перемещения h_z погруженного тела возникающая под воздействием подъемной силы от первоначально заданного заглубления модели h_{sub} .

Результаты модельных экспериментов движения модели №1

На первом этапе экспериментального исследования моделировалось движение модели погруженного тела №1 с формой поперечного сечения в виде круга.

На рис. 4 показаны зависимости величины w^* = w_m/L_m от числа Фруда. Результаты моделирования ИГВ в ледяном покрове сопоставлялись с данными по волнообразованию от движения модели на чистой воде.

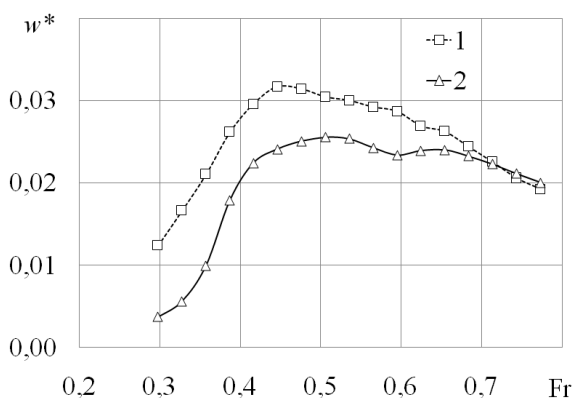


Рис. 4. Зависимости w^* от относительной скорости движения модели погруженного тела №1

1) вблизи свободной поверхности воды; 2) при наличии ледяного покрова $h_i=2$ мм

При движении модели значение w^* для случая свободной поверхности воды в диапазоне $0,3 < Fr < 0,62$ существенно превышало значения относительных прогибов ледяного покрова, особенно при малых скоростях движения. При $Fr > 0,62$ разность между величинами становилась не значительной и практически совпадала. Движение вблизи нижней поверхности льда приводило к смещению величины критической скорости движения, т.е. скорости при которой волнообразование становилось максимальным в большую сторону чисел Фруда от

$Fr \approx 0,45$ для случая свободной поверхности воды до $Fr \approx 0,5$ при наличии льда.

С целью определения ледоразрушающей способности ИГВ были построены зависимости геометрического критерия ледоразрушения α от относительной скорости движения (рис. 5). Для оценки эффективности использования критерия α полученные результаты сравнивались с характером разрушения модельного льда ИГВ при различных числах Фруда (рис. 6). Стоит отметить, что полученные изображения достаточно хорошо коррелируют со значениями α соответствующими полному разрушению ледяного покрова и равному $\alpha > 0,04$ [8].

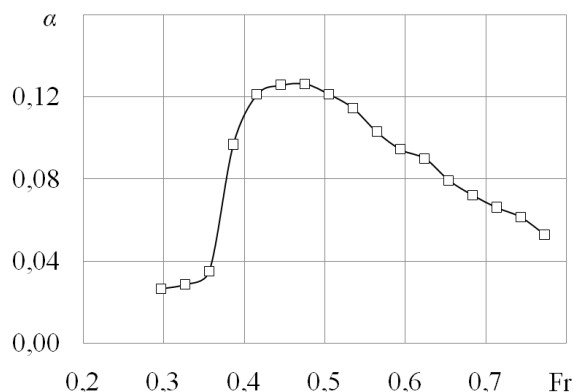


Рис. 5. Зависимость коэффициента α от относительной скорости движения модели №1

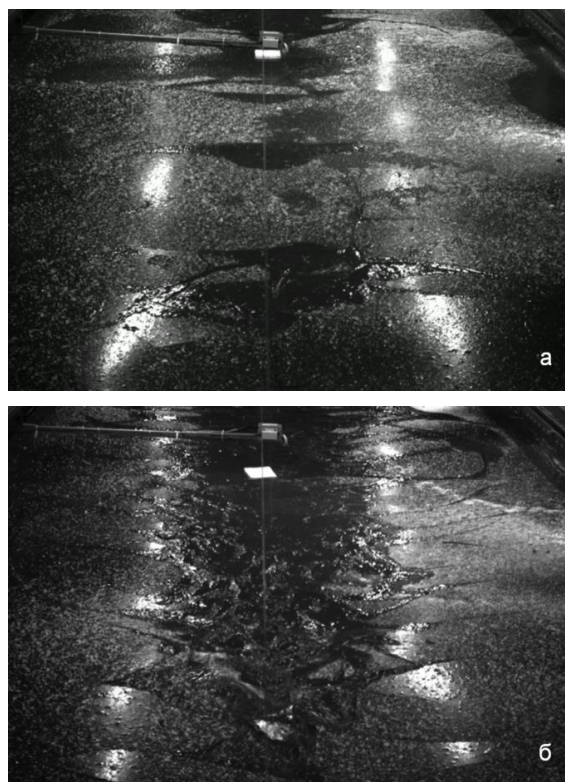




Рис. 6. Разрушение модельного льда ИГВ от движения модели №1

а) $Fr=0,39$; б) $Fr=0,45$; в) $Fr=0,54$; г) $Fr=0,65$

При движении модели на относительной скорости $0,3 < Fr < 0,36$ разрушения льда ИГВ не происходило. При $Fr=0,39$ наблюдался резкий скачок в кривизне ИГВ и соответственно рост их ледоразрушающей способности. Начиналось формирование магистральных трещин на вершине и подошве ИГВ, тем не менее, интенсивность разрушения льда была низкой, измельчение льдин не происходило (рис. 6а).

В диапазоне относительных скоростей $0,42 < Fr < 0,54$ наблюдались как максимальные значения величины α (рис. 5), так и наиболее эффективное разрушение льда ИГВ (рис. 6б-в). Площадь разрушения ледяного поля постепенно возрастала, достигая своего максимума при критической скорости движения модели равной порядка $Fr \approx 0,5$. Кривизна ИГВ становилась максимальной. Над траекторией движения модели наблюдалось крайне интенсивное разрушение ледяного покрова, измельчение и переворачивание льдин. Лед полностью терял свою несущую способность.

Дальнейшее увеличение относительной скорости движения приводило к уменьшению кривизны ИГВ вследствие существенного роста длины волн. Ледоразрушающая способность ИГВ сильно снижалась (рис. 5), тем не менее, даже при сверхкритической скорости движения во льду формировались как магистральные, так и продольные трещины (рис. 6г).

Неравномерное распределение давления по верхней и нижней поверхности погруженного тела приводило к возникновению вертикальной подъемной силы F_z , которая оказывала значительное влияние на движение модели притягивая, либо отталкивая ее от свободной

поверхности воды. Наличие ледяного покрова вносило дополнительные изменения в характер движения тела.

График экспериментальных зависимостей относительного вертикального перемещения h_m/h_{sub} от числа Фруда показан на рис. 7. Отметим, что $h_m/h_{sub}=0$ соответствовало первоначально заданной величине заглубления модели. Результаты сопоставлялись с данными полученными для случая свободной поверхности воды.

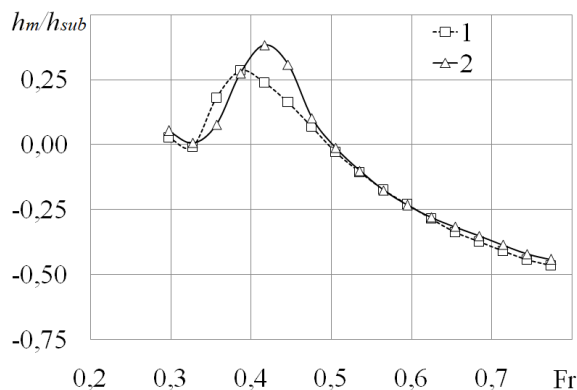


Рис. 7. Зависимости h_m/h_{sub} от относительной скорости движения модели погруженного тела №1 1) вблизи свободной поверхности воды; 2) при наличии ледяного покрова $h_i=2$ мм

Зависимости показывают, что изменение относительного заглубления при движении модели с различной скоростью имеет сложный характер и может достигать значительных величин по сравнению с первоначальным значением h_{sub} . При относительных скоростях движения $Fr=0,3-0,39$ модель испытывала подъемную силу, которая притягивала ее к свободной поверхности, уменьшая величину заглубления h_m (рис. 7). Наличие ледяного покрова приводило к смещению максимума h_m/h_{sub} на величину $Fr \approx 0,42$. В этих случаях расстояние h_m до поверхности было минимальным. Кроме того в результате воздействия гидродинамического момента появлялся значительный дифферент на нос и модель практически контактировал с нижней поверхностью льда кормовой оконечностью. Несмотря на минимальное расстояние между моделью и льдом эффективность разрушения ледяного покрова была не высока.

Дальнейшее увеличение скорости движения приводило к росту глубины погружения модели тела. При $Fr \approx 0,51-0,52$ заглубление модели становилось равным первоначально заданному h_{sub} для обоих случаев движения (рис. 7).

При сверхкритическом режиме движения разницы между значениями h_m/h_{sub} для обоих рассмотренных случаев практически не фиксировалась.

Влияние формы поперечного сечения тела на характер движения и параметры ИГВ

Для дальнейшего проведения исследования использовались модели погруженных тел №2-3 и №2.1-3.1. Все модели имели равную длину корпуса L_m , ширину B_m и длину цилиндрической вставки, однако отличались формой поперечного сечения и высотой корпуса H_m (см. рис. 3). Определенные экспериментально параметры движения тела и ИГВ

сравнивались с данными полученными для модели №1, которая имела круговую форму поперечного сечения.

На рис. 8 показаны сопоставление зависимости относительной величины w^* от числа Фруда для моделей №2 и №3, а на рис. 9 для моделей №2.1 и №3.1. Анализ результатов показывает, что при движении моделей с плохобтекаемой формой корпуса генерировались ИГВ со значительно большей амплитудой, чем при движении модели №1 имеющей форму корпуса в виде тела вращения. В результате прогибы ледяного покрова значительно возрастали, особенно в диапазоне скоростей близких к критическому значению, которое составило $Fr \approx 0,5$.

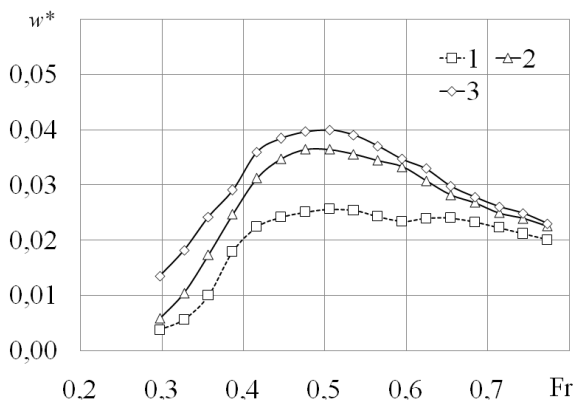


Рис. 8. Зависимости w^* ледяного покрова $h_i=2$ мм от относительной скорости движения моделей погруженных тел
1) модель №1; 2) модель №2; 3) модель №3

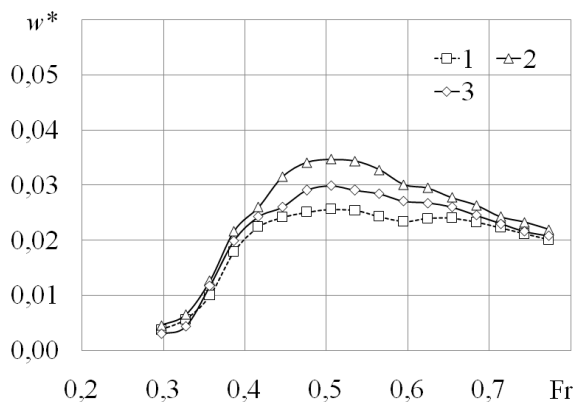


Рис. 9. Зависимости w^* ледяного покрова $h_i=2$ мм от относительной скорости движения моделей погруженных тел
1) модель №1; 2) модель №2.1; 3) модель №3.1

При движении с относительной скоростью $Fr=0.3-0.42$ значительная разница между значениями w^* наблюдалась для моделей №2 и №3 имеющих большую площадь сечения по мидель-шпангоуту, чем у модели №1. Для моделей №2.1 и №3.1 значение β , которых было сопоставимо с моделью №1, разность в величине w^* была не значительной. При движении на относительных скоростях $Fr > 0,65$ значения w^* для всех моделей практически не отличались.

Рост прогибов льда приводил к значительному увеличению кривизны ИГВ и, следовательно, к их ледоразрушающей способности. Особенно ярко это проявлялось при движении подо льдом модели №3 имеющей как максимальное водоизмещение, так и наиболее плохобтекаемую форму корпуса с формой поперечного сечения по мидель-шпангоуту близкой к квадратной. Величина α принимала значения, значительно превышающие необходимые для разрушения льда ИГВ во всем диапазоне исследуемых скоростей (рис. 10). В результате даже при относительной скорости движения $Fr=0,3$ наблюдалось интенсивное разрушение ледяного покрова.

Ледоразрушающая способность ИГВ генерируемых от движения модели №2 была меньше чем от модели №3, а эффективное разрушение льда начиналось при $Fr=0,36$ (рис. 10).

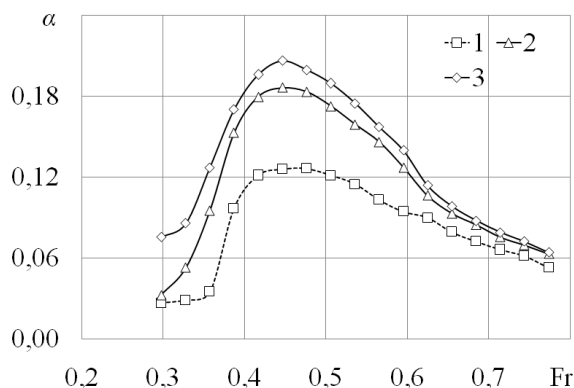


Рис. 10. Зависимость коэффициента α от относительной скорости движения
1) модель №1; 2) модель №2; 3) модель №3

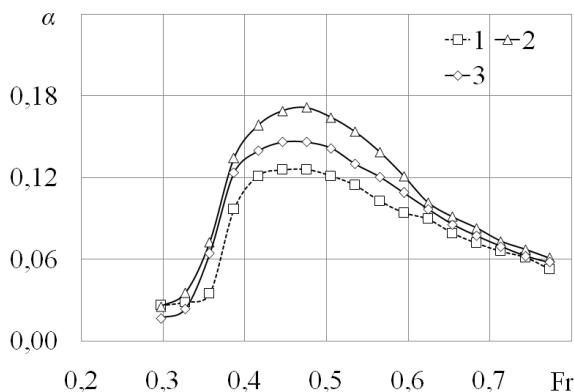


Рис. 11. Зависимость коэффициента α от относительной скорости движения
1) модель №1; 2) модель №2.1; 3) модель №3.1

Интенсивность формирования трещин во льду от движения моделей №2.1 и №3.1 с относительной скоростью $0,3 < Fr < 0,39$ была сопоставима с интенсивностью от движения модели №1 (рис. 11). При $Fr=0,39$ наименее эффективное разрушение льда наблюдалось при движении модели №2.1, несмотря на большие значения α по сравнению с моделью №3.1, что очевидно связано с меньшей площадью поперечного сечения корпуса (рис. 12).

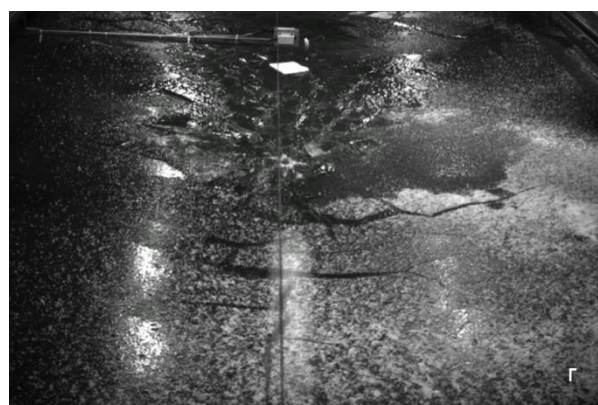
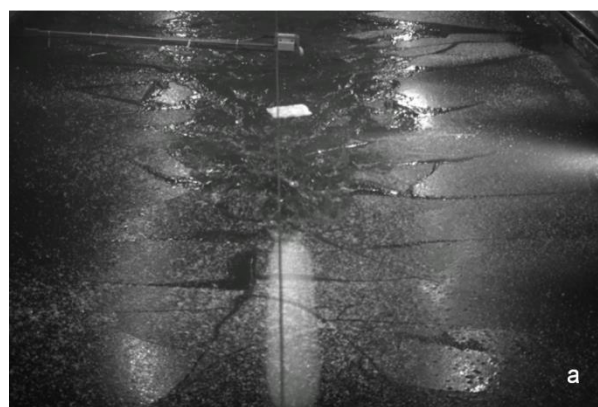


Рис. 12. Разрушение модельного льда ИГВ от движения моделей погруженных тел при $Fr=0,39$
а) модель №2; б) модель №3; в) модель №2.1; г) модель №3.1

Рис. 13. Разрушение модельного льда ИГВ от движения моделей погруженных тел при $Fr=0,45$
а) модель №2; б) модель №3; в) модель №2.1; г) модель №3.

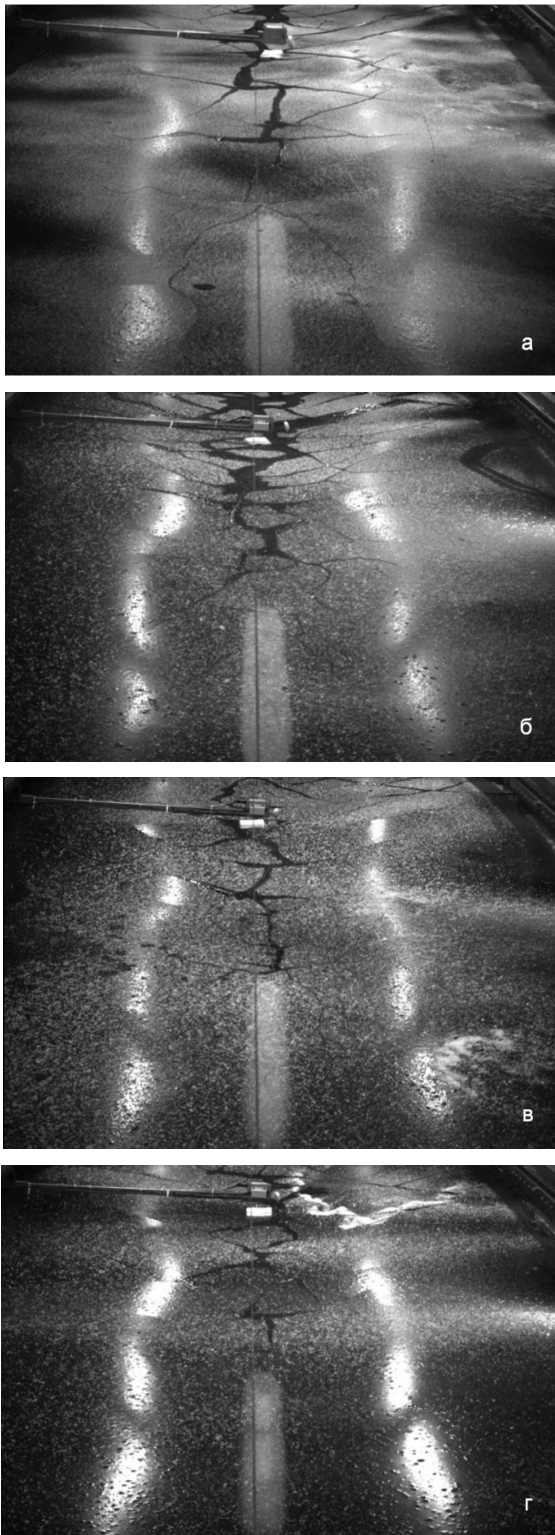


Рис. 14. Разрушение модельного льда ИГВ от движения моделей погруженных тел при $Fr=0,65$
а) модель №2; б) модель №3; в) модель №2.1; г) модель №3.1

В диапазоне чисел Фруда $0,42 < Fr < 0,59$ фиксировалось резкое увеличение ледоразрушающей способности ИГВ для плохобтекаемых тел (рис. 10-11). Эффективность разрушения льда значительно возрастала (рис. 13). Наибольшая площадь разрушения наблюдалась от движения моделей №2 и №3.

Рост относительной скорости движения моделей приводил к снижению ледоразрушающей способности ИГВ (рис. 10-11). При $Fr > 0,62$ разница между значениями α была не значительной, тем не менее, характер разрушения льда сильно зависел как от формы, так и от параметров погруженных тел (рис. 14).

Далее был проанализирован характер движения моделей в приповерхностной водной среде. На рис. 15-18 показаны зависимости относительного вертикального перемещения h_m/h_{sub} от чисел Фруда для случаев движения погруженных тел вблизи нижней поверхности льда и на чистой воде.

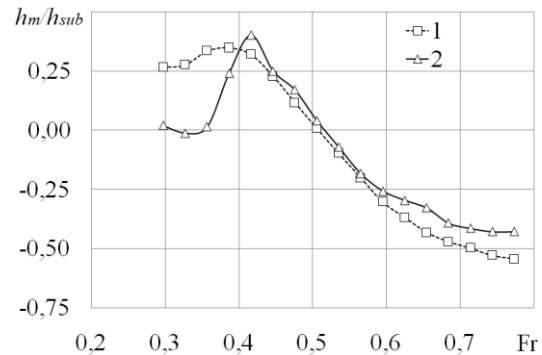


Рис. 15. Зависимости h_m/h_{sub} от относительной скорости движения модели тела №2
1) вблизи свободной поверхности воды; 2) при наличии ледяного покрова

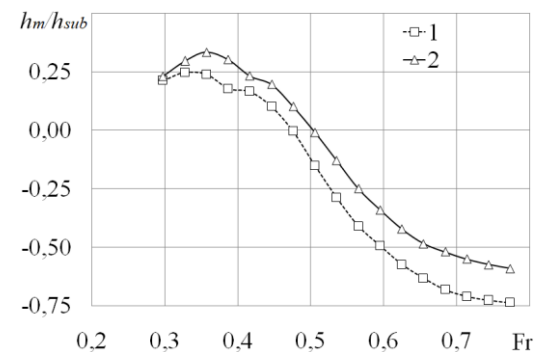


Рис. 16. Зависимости h_m/h_{sub} от относительной скорости движения модели тела №3
вблизи свободной поверхности воды; 2) при наличии ледяного покрова

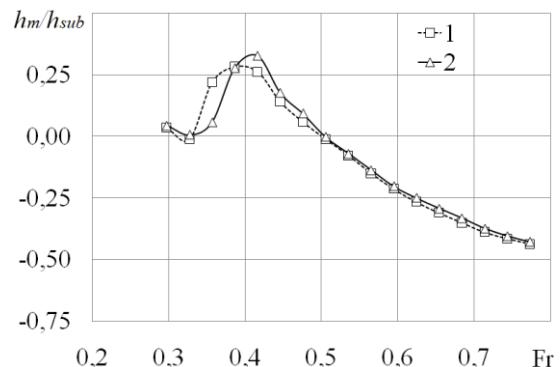


Рис. 17. Зависимости h_m/h_{sub} от относительной скорости движения модели тела №2.1
1) вблизи свободной поверхности воды; 2) при наличии ледяного покрова

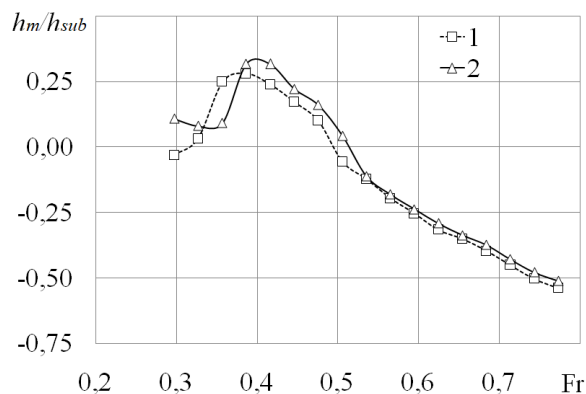


Рис. 18. Зависимости h_m/h_{sub} от относительной скорости движения модели тела №3. 1) вблизи свободной поверхности воды; 2) при наличии ледяного покрова

В целом кривые имеют схожий между собой характер. Наличие ледяного покрова приводило к росту подъемной силы и соответственно величины вертикального перемещения. Для моделей №2, №2.1 и №3.1 наблюдалось смещение локального максимума относительного перемещения h_m/h_{sub} с $Fr=0,39$ до $Fr=0,42$. Для модели №3 локальный максимум был зафиксирован на относительной скорости $Fr=0,36$ при движении вблизи свободной

поверхности и $Fr=0,42$ при движении вблизи ледяного покрова (рис. 16).

Заключение

В целом проведенное исследование показывает, что на характер движения погруженного тела в приповерхностной водной среде и на параметры генерируемых при этом ИГВ существенное влияние оказывает водоизмещение тела, а также площадь и форма его поперечного сечения по мидель-шпангоуту. Движение моделей с плохообтекаемой формой корпуса близкой в сечении к квадратной (модель №3) или прямоугольной (модель №3.1) приводило к значительно более эффективному разрушению льда, чем при движении моделей №2 и №2.1. Характер движения плохообтекаемых моделей также имел более сложную зависимость и большие значения величины h_m/h_{sub} , что очевидно связано со значительной по длине плоской формой верхней проекции моделей и ее взаимодействием с взволнованной поверхностью льда. По этой причине, как показали эксперименты, движение подводных аппаратов с подобной формой корпуса в ледовых условиях на малом заглублении в диапазоне скоростей $0.3 < Fr < 0.39$ может оказаться не безопасным и привести к контакту их кормовой оконечности с нижней поверхностью ледяного покрова.

Литература

1. Broglia R., Mascio A. Di, Muscari R. Numerical study of confined water effects on self-propelled submarine in steady manoeuvres. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2007. Vol. 17. P. 89-96.
2. Jagadeesh P., Murali K. RANS predictions of free surface effects on axisymmetric underwater body // Eng Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2010. Vol. 4(2). P. 301–313.
3. Mansoorzadeh S., Javanmard E. An investigation of free surface effects on drag and lift coefficients of an autonomous underwater vehicle (AUV) using computational and experimental fluid dynamics methods // Journal of Fluids and Structures, 2014. Vol. 51. P. 161–171.
4. Nematollahi A., Dadvand A., Dawoodian M. An axisymmetric underwater vehicle free surface interaction: a numerical study. Ocean Engineering, 2014. Vol. 96. P. 205–214.
5. Carrica P., Kerkvliet M., Quadvlieg F., Pontarelli M., Martin J. CFD simulations and experiments of a maneuvering generic submarine and prognosis for simulation of near surface operation. Proceedings of the 31st Symposium on Naval Hydrodynamics, Monterey, CA, USA, 2016. P. 11-16.
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. Gourlay T., Dawson E. Havelock Source Panel Method for Near-surface Submarines. J. Marine Sci. Appl, 2015. Vol. 14. p.215-224.
10. Mackay M.A. Review of Sting Support Interference and Some Related Issues fo the Marine Dynamic Test Facility (MDTF). St. John's, Newfoundland: Defence Research Establishment Atlantic, 1993.
11. Земляк В.Л., Козин В.М. Ледовый бассейн лаборатории ледотехники. Вестник Приамурского гос. ун-та им. Шолом-Алейхема, 2021. № 1(42). С. 19–31.
12. Войткунский Я.И. Сопротивление движению судов. Л.: Судостроение, 1988, 288 с.
13. Ногид Л.М. Моделирование движения судна в сплошном ледяном поле и в битых льдах. Труды ЛКИ. 1959. Вып. 28. С. 179–185.
14. 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.
15. Петров И.Г. Выбор наиболее вероятных значений механических характеристик льда. Труды ААНИИ, 1976. Т.331. С. 4-41.
16. Lewis J.W. Recent Development in Phisical Ice Modeling. Offshore Technol. Conf. Houston. Texas, 1982. Vol. 4. P. 493–498.
17. 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.

References

1. Broglia R., Mascio A. Di, Muscari R. Numerical study of confined water effects on self-propelled submarine in steady manoeuvres. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2007. Vol. 17. P. 89-96.
2. Jagadeesh P., Murali K. RANS predictions of free surface effects on axisymmetric underwater body // *Eng Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2010. Vol. 4(2). P. 301–313.
3. Mansoorzadeh S., Javanmard E. An investigation of free surface effects on drag and lift coefficients of an autonomous underwater vehicle (AUV) using computational and experimental fluid dynamics methods // *Journal of Fluids and Structures*, 2014. Vol. 51. P. 161–171.
4. Nematollahi A., Dadvand A., Dawoodian M. An axisymmetric underwater vehicle free surface interaction: a numerical study. *Ocean Engineering*, 2014. Vol. 96. P. 205–214.
5. Carrica P., Kerkvliet M., Quadvlieg F., Pontarelli M., Martin J. CFD simulations and experiments of a maneuvering generic submarine and prognosis for simulation of near surface operation. *Proceedings of the 31st Symposium on Naval Hydrodynamics*, Monterey, CA, USA, 2016. P. 11-16.
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. Gurlay T., Dawson E. Havelock Source Panel Method for Near-surface Submarines. *J. Marine Sci. Appl.*, 2015. Vol. 14. p.215-224
10. Mackay M.A. Review of Sting Support Interference and Some Related Issues fo the Marine Dynamic Test Facility (MDTF). St. John's, Newfoundland: Defence Research Establishment Atlantic, 1993.
11. 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.
12. Voitkunsky Ya.I. Resistance to the movement of ships. L.: Shipbuilding, 1988, 288 p.
13. 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.
14. 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.
15. Petrov I.G. Selection of the most probable values of the mechanical characteristics of ice. *Proceedings of the AANII*, 1976. T.331. pp. 4-41.
16. Lewis J.W. Recent Development in Physical Ice Modeling. *Offshore Technol. Conf. Houston. Texas*, 1982. Vol. 4. P. 493–498.
17. 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.

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

Виталий Леонидович Земляк, кандидат физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории ледотехники, Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, 679015, г. Биробиджан, ул. Широкая, 70а, e-mail: vellkom@list.ru

Виктор Михайлович Козин, 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, 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

Алексей Сергеевич Васильев, кандидат технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории ледотехники, Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, 679015, г. Биробиджан, ул. Широкая, 70а, e-mail: vasil-grunt@mail.ru

Alexey S. Vasilyev, Ph.D. (Eng), associate professor, chief researcher, laboratory of ice technology, Sholom-Aleichem Priamursky State University, Shirokaya, 70a, Birobidzhan, 679015, Russian Federation, e-mail: vasil-grunt@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.06.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.07.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 15.08.2023.

Научная статья

УДК 629.124

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.048>

Прогнозирование ходкости речного ледокола проекта 1105 с использованием модельного эксперимента

М.А. Панакушин¹ panakushin921@yandex.ru, А.Г. Ларин¹ alexandr_ks1@mail.ru,
К.Д. Блинов¹ blinov.kirill@yandex.ru, М.А. Панченко¹ maxp4nchenko@yandex.ru

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

Аннотация. Проведение натурных испытаний ледоколов с целью исследования ледовой ходкости помимо высоких материальных затрат, требует вывод судов из эксплуатации. Поэтому активно используется модельный эксперимент. Одно из главных преимуществ модельных испытаний ледоколов — это возможность прогнозирования ледовой ходкости на ранних этапах проектирования. В статье описывается метод определения сопротивления при движении судна в сплошном ледяном поле с использованием модельного эксперимента. Описаны испытания модели ледокола проекта 1105 в масштабе 1:50. В качестве модели льда использовался тонкий естественный лед. Приведен алгоритм проведения экспериментов и методика пересчета его результатов на натурное судно. Для пересчета результатов модельного эксперимента на натуру использовалась упрощенная методика без разделения ледового сопротивления на составляющие разрушения и обломков льда. В статье приведено сравнение результатов модельного эксперимента с натурными данными. В дальнейшем планируется использовать результаты проведенных испытаний для настройки полуэмпирических моделей сопротивления с применением методов множественной линейной регрессии с целью прогнозирования ледовой ходкости судов на ранних стадиях их проектирования.

Ключевые слова: модель ледокола, модель льда, ледовый опытовый бассейн, результаты эксперимента, ледовое сопротивление, пересчет на натурное судно.

Финансирование: представленные результаты получены по проекту РНФ № 22-19-00376 «Экспериментально-теоретическое исследование полуэмпирических моделей взаимодействия судов со льдом».

Для цитирования: Панакушин М.А., Ларин А.Г., Блинов К.Д., Панченко М.А. Прогнозирование ходкости речного ледокола проекта 1105 с использованием модельного эксперимента. 2023. № 3 часть 3, С. 88—93. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.048

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.048>

Predicting the ice seaworthiness of the Project 1105 river icebreaker using a model experiment

Matveu A. Panakushin¹ panakushin921@yandex.ru, Alexandr G. Larin¹ alexandr_ks1@mail.ru,
Kirill D. Blinov¹ blinov.kirill@yandex.ru, Maxim A. Panchenko maxp4nchenko@yandex.ru

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

Abstract. When conducting full-scale tests of icebreakers to study their ice seaworthiness, in addition to high material costs, temporary decommissioning of vessels is required. To avoid this, model experiments are actively used. One of the main advantages of testing icebreaker models is the ability to predict the seaworthiness of vessels at the early stages of design. This paper describes a method for determining the resistance of a vessel moving through a solid ice field in a model experiment. Tests of the Project 1105 river icebreaker on a scale of 1:50 are described. Thin natural ice was used as a model ice. The algorithm of experiments and the method of recalculating its results on a full-scale vessel are given. To recalculate the results of the model experiment, a simplified technique was used without dividing the ice resistance into components of ice destruction and fragmentation. The article compares the results of a model experiment with full-scale ship data. In the future, it is planned to use the results of the conducted tests to adjust semi-empirical resistance models using multiple linear regression methods to predict the ice seaworthiness of ships at the early stages of their design.

Key words: icebreaker model, model of ice, ice test basin, experimental results, ice resistance, recalculation for full-scale vessel.

Financial Support: the presented results were obtained under the project of the Russian Science Foundation No. 22-19-00376 «Experimental and theoretical study of semi-empirical models of the interaction of ships with ice».

For citation: Matveu A. Panakushin, Alexandr G. Larin, Kirill D. Blinov, Maxim A. Panchenko, Predicting the ice seaworthiness of the Project 1105 river icebreaker using a model experiment, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 3, P. 88—93. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.048

Введение

Проведение натурных испытаний, в отличие от модельных, с целью исследования ледовой ходкости, помимо высоких затрат, требует вывод

действующего судна из эксплуатации. Одно из главных преимуществ модельных испытаний — это возможность исследования движения судна на ранних этапах проектирования, для дополнительного подтверждения условий технического задания [9].

Ледокол «Капитан Зарубин» является последним линейным ледоколом в серии из шести ледоколов проекта 1105, которая была построена по заказу СССР на верфи Wärtsilä, Хельсинки, Финляндия. В данную серию также входят ледоколы: «Капитан Чечкин», «Капитан Плахин», «Капитан Букаев», «Капитан Чадаев», «Капитан Крутов». Линейные ледоколы проекта 1105 относятся к типу «река-море». Суда предназначены для работы в морских портах юга, запада и севера России. Они эксплуатируются на Волге, Неве, на Азовском море, в Финском заливе Балтийского моря. Ледоколы проекта 1105 используются для осуществления проводки караванов судов в условиях сложной ледовой обстановки, а также в качестве портовых ледоколов. Все шесть ледоколов в настоящее время находятся в эксплуатации [7].

В опытовом бассейне Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ) были проведены испытания модели речного ледокола проекта 1105.

В статье Приведены результаты исследований ходкости ледокола проекта 1105 в опытовом бассейне в тонком естественном льду. Описана методика проведения модельного эксперимента. Выполнено сравнение результатов экспериментальных исследований с натурными.

1. Методика проведения экспериментов

В качестве модели льда использовался тонкий естественный лед, намораживаемый в бассейне при отрицательных температурах воздуха. На возможность такого подхода указывал еще Л.М. Ногид [2, 5, 8, 10]. Тонкий естественный лед имеет склонность к увеличению своей прочности на разрушение с уменьшением толщины, что в свою очередь послужило распространению мнения о невозможности моделирования в соответствии со строгой теорией моделирования. Однако, при использовании естественного льда компенсировать его повышенную прочность можно уменьшением его толщины. Многолетний опыт работы ледового бассейна НГТУ показал на возможность такого подхода [1, 3, 5, 6].

Испытания модели ледокола были проведены в опытовом бассейне кафедры «Кораблестроение и Авиационная техника» НГТУ, который имеет

гравитационную систему буксировки. Лед намораживается путем естественного охлаждения воды.

Основные характеристики ледокола приведены в табл. 1 [7]. В табл. 1 также приведены характеристики модели ледокола, выполненной в масштабе 1:50. Внешний вид ледокола и модели ледокола представлен на рис. 1, 2.

Для прогнозирования ходкости ледокола необходимо провести серию опытов с целью определения ледового сопротивления в различных толщинах льда.

В ходе эксперимента фиксировались следующие параметры: сопротивление движению модели, определяемое весом буксировочного груза, с учетом коэффициента пропорциональности; скорость установившегося движения модели скорость с помощью оптического датчика и АЦП; среднюю толщину намороженного ледяного поля; температура воды и воздуха.



Рис. 1. Ледокол проекта 1105 «Капитан Зарубин»



Рис. 2. Модель ледокола проекта 1105 (масштаб 1:50)

Таблица 1

Основные характеристики ледокола проекта 1105 и его модели

Характеристики	Размерность	Ледокол пр. 1105	Модель ледокола пр. 1105 (Масштаб 1:50, $\lambda=50$)
Длина судна по КВЛ $L_{\text{квл}}$	м	71,0	1,46
Ширина судна по КВЛ В	м	16,0	0,32
Высота борта Н	м	4,8	0,10
Осадка T_{max}	м	3,5	0,070
Водоизмещение D	т или кг	2472 т	19,8 кг
Тяга на швартовах	кН	414	-
Мощность	кВт	4650	-
Предельная толщина льда	см	70	0,32

Алгоритм проведения экспериментов следующий.
1) Модель устанавливается в бассейн и балластируется до необходимой посадки. Балластировочный груз фиксируется на модели. Модель вынимается из бассейна и взвешивается.

2) В бассейн устанавливается термометр для измерения температуры воды.

3) Испытания проводятся при заданном тяговом усилии (сопротивлении), которое остается постоянным для серии испытаний в разных толщинах льда. Следующая серия испытаний

проводится при другом тяговом усилии и т.д. Испытания проводятся для тяги 0,8; 0,9; 1,0; 1,2 от тяги P_e на швартовном режиме.

- 4) Водная поверхность бассейна зачищается от кристаллов льда и снега.
 - 5) Измеряется температура воздуха. Выдерживается время для намораживания льда заданной толщины. Время наморозки льда требуемой толщины зависит от температуры воздуха. Толщина нарастающего льда периодически контролируется. Измерение толщины льда производится штангенциркулем, предварительно вынесенным на улицу и охлажденным.
 - 6) Осуществляются холостые прогоны буксировочной системы. Определяется величина сопротивления трения в системе путем подвешивания груза до равномерного движения бесконечного груза.
 - 7) После получения толщины льда в заданном диапазоне модель запрягается в буксировочную систему. Модель крепится к замкнутому тросу за вертикальную буксирующую штангу, расположенную в корме модели судна, а также через носовые штанги, обеспечивающие прямолинейную траекторию движения. Такой способ закрепления не исключает возможные вертикальные перемещения модели во время движения.
 - 8) Подвешивается требуемый буксировочный груз, осуществляется движение модели под действием падающего груза. Буксировочный груз, пропорционален силе, прикладываемой к модели.
 - 9) Фиксируется скорость движения модели, величина буксировочного груза. Факт равномерного движения модели определяется по шкале частотомера, когда показания приборов при движении модели остаются постоянными. Производятся визуальные наблюдения взаимодействия модели со льдом.
 - 10) В процессе проведения испытания производятся фото- и видеосъемка.
 - 11) После прогона модели судна в сплошном льду осуществляется окончательный замер толщины льда в 5 точках по длине бассейна охлажденным штангенциркулем и определяется его среднеарифметическое значение.
 - 12) Измеряется температура воды в бассейне.
 - 13) После испытаний в сплошном льду производится испытание модели в полученном канале битого естественного льда с целью разделения сопротивления на составляющие сопротивления разрушения и сопротивления обломков.
 - 14) После каждого испытания битый лед из бассейна удаляется и вновь намораживается новый ледяной покров. По мере удаления льда из бассейна уровень воды в бассейне снижается. При чрезмерном понижении уровня воды производится долив до требуемого уровня.
- В ходе эксперимента фиксировались следующие параметры: сопротивление и скорость движения модели; средняя толщина приготовленного ледового поля; температура воды в бассейне и окружающего воздуха. Сопротивление движению модели задавалось весом буксировочного груза. Скорость фиксировалась фотоимпульсным способом.

Тяговое усилие остается постоянным для серии опытов в определенном диапазоне толщины льда. Серии опытов проводятся для 0,8; 0,9; 1,0; 1,2 от тягового усилия на швартовном режиме судна.

Иллюстрации по проведению экспериментальных исследований ледовой ходкости модели ледокола приведены на рис. 3, 4.

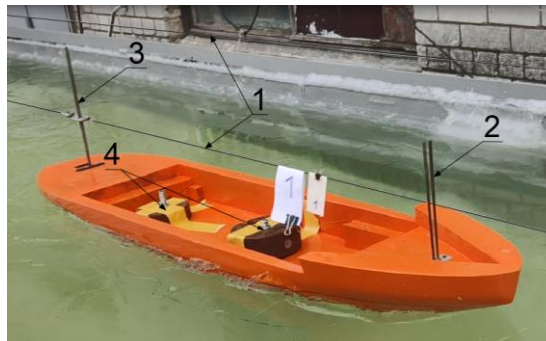


Рис. 3. Модель во время движения:
1 – буксировочный трос; 2 – носовые штанги; 3 – кормовая штанга; 4 – балласт



Рис. 4. Движение модели в тонком естественном льду толщиной 1,5 мм

2. Методика пересчета экспериментальных данных

Пересчет сопротивления движения модели на натурное судно был произведен по упрощенной методике [6] без экспериментального разделения сопротивления модели на составляющие сопротивление разрушения и сопротивление обломков льда.

Таблица 2

Результаты проведенных испытаний

Дата	R, H	$v, m/s$	h_{cp}, mm	Примечание
16.01.2023	3,26	0,88	2,5	$t_{воздуха} = -6^\circ$ $Ct_{воды} = 0.5^\circ$ С
	3,26	0,62	3,38	
	3,26	1	2	
	3,26	0,75	2,92	
17.01.2023	3,26	0,22	4,28	$t_{воздуха} = -8^\circ$ $Ct_{воды} = 0.5^\circ$ С
	4,07	1	2,88	
18.01.2023	4,07	0,67	3,86	$t_{воздуха} = -3^\circ$ $Ct_{воды} = 0^\circ$
	4,07	0,85	3,36	
	4,07	1,15	1,93	

19.01.2023	2,93	0,73	2,16	$t_{\text{воздуха}} = -3^{\circ}$ $Ct_{\text{воды}} = 0.2^{\circ}$
21.01.2023	2,93	0,4	3,48	$t_{\text{воздуха}} = -3^{\circ}$ $Ct_{\text{воды}} = 0.5^{\circ}$
	2,93	0,84	1,88	C
	2,93	0,8	1,83	
22.01.2023	2,93	0,6	2,82	$t_{\text{воздуха}} = -5^{\circ}$ $Ct_{\text{воды}} = 0^{\circ}$
	4,07	1,1	1,96	
	2,93	0,35	3,3	
23.01.2023	2,28	0,65	2,4	$t_{\text{воздуха}} = -6^{\circ}$ $Ct_{\text{воды}} = 0^{\circ}$
	2,28	0,54	2,34	
	2,28	0,77	1,8	
24.01.2023	2,28	0,14	3,32	$t_{\text{воздуха}} = -7^{\circ}$ $Ct_{\text{воды}} = 0^{\circ}$
	2,28	0,4	2,88	

Чистое ледовое сопротивление R_H , толщина натурального льда, скорость движения ледокола пересчитываются по формулам:

$$R_H = \lambda^3 R_M; h_H = \lambda^{4/3} h_M; v_H = \sqrt{\lambda} v_M,$$

где индекс «н» – обозначает натурное судно, «м» – модель.

Тяга ледокола рассчитана по зависимости [4]:

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

где P_T – тяга на гаке, $P_{\text{ш}}$ – тяга на швартовах, v – текущая скорость, v_0 – скорость движения на чистой воде.

По результатам опытов из табл.2 были получены графики зависимости сопротивления при движении модели в ледяных полях различной толщины от 1,9 мм до 3 мм (рис. 5).

Графики зависимости сопротивления движения натурального судна в зависимости от скорости и толщины льда с наложенной на них тягой на гаке P_T приведены на рис. 6. По ним получена диаграмма ледопроеходимости (рис. 7). На рис. 7 также нанесены данные, полученные с натурных испытаний проекта ледокола проекта 1105 [6].

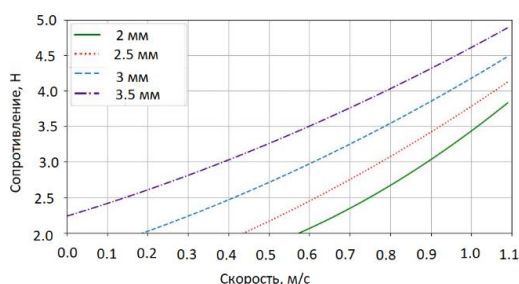


Рис. 5. Графики зависимости сопротивления движению модели ледокола проекта 1105

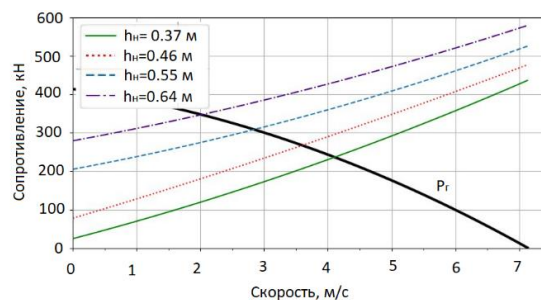


Рис. 6. Графики зависимости сопротивления ледокола проекта 1105

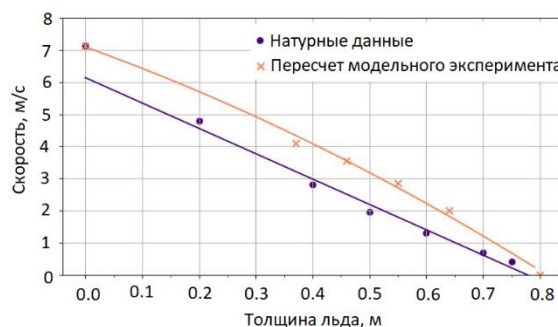


Рис. 7. Диаграммы ледопроеходимости ледокола проекта 1105:

1 – результат модельных испытаний с учетом пересчета; 2 – данные натурных испытаний [4]

По рис. 7 можно сделать следующие выводы. При приближении толщины льда к предельной, уменьшается расхождение результатов модельного эксперимента и натурных данных. Это связано с тем, что натуральный лед, редко встречается бесснежным. Снег, в свою очередь, создает дополнительное сопротивление движения судна. Также расхождение результатов можно объяснить пересчетом сопротивления движению модели на натурное судно по упрощенной методике [6] без разделения на составляющие разрушения и обломков.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования будут использованы для настройки полуэмпирических моделей сопротивления [2] с применением методов множественной линейной регрессии. Полученные математические модели будут использованы для прогнозирования ледовой ходкости судов на начальных этапах проектирования.

Литература

1. Беляков В.Б. Экспериментальные исследования ледопроеходимости судов в новой модели льда. Проектирование средств продления навигации: Межвуз. Сб. Горьков. Политехн. Ин-та. Горький, 1986. С. 79-84.
2. Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Куркин А.А. Физическое моделирование сопротивления сплошного льда движению судов. Экологические системы и приборы № 12. 2022. С 82 – 89.
3. Зуев В.А., Беляков В.Б., Грамузов Е.М. Способ испытания моделей судов ледового плавания. А.с. № 1071515 от 07.02.84. Опубл. 07.02.84, Бюл. № 5.

4. Зуев В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях. – Л.: Судостроение, 1986. – 208 с.
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.Н. Ледовая ходкость судов: Монография. – СПб.: Судостроение, 2001. – 512 с.
7. Ионов Грамузов Е.Н., Зуев В.А. Проектирование ледоколов: Монография. – СПб.: Судостроение, 2013. – 512 с.
8. Ногид Л.М. Моделирование движения судна в сплошном ледяном поле и битых льдах. Сб. науч. тр. ЛКИ. Л., 1959.- Вып.28.- С.179-185.
9. Сазонов К.Е. Модельный и натурный эксперименты в морской ледотехнике. Санкт-Петербург: Крыловский государственный научный центр, 2021.
10. Шиманский Ю.А. Теория моделирования движения судна в сплошном ледяном поле. Сб. науч. тр. ААНИИ.- Л., 1960.- Т.237.- С.39-29.

References

1. Belyakov V.B. Eksperimental'nye issledovaniya ledoprokhodimosti sudov v novoy modeli l'da. Proektirovanie sredstv prodleniya navigatsii: Mezhdvuz. Sb. Gor'kov. Politekh. In-ta. Gor'kiy, 1986. S. 79-84.
2. Gramuzov E.M., Kalinina N.V., Kurkin A.A. Fizicheskoe modelirovanie soprotivleniya sploshnogo l'da dvizheniyu sudov. [Physical modeling of solid ice resistance to ship movement] Ekologicheskie sistemy i pribory № 12. 2022. S 82 – 89.
3. Zuev V.A., Belyakov V.B., Gramuzov E.M. Sposob ispytaniya modeley sudov ledovogo plavaniya. [Method of testing models of ice navigation ships] A.s. № 1071515 ot 07.02.84. Opubl. 07.02.84, Byul. № 5.
4. Zuev V.A. Sredstva prodleniya navigatsii na vnutrennikh vodnykh putyakh. – L.: Sudostroenie, 1986. – 208 s.
5. Zuev V.A., Gramuzov E.M. Novye podkhody k modelirovaniyu ledovoy sredy pri model'nykh ispytaniyakh sudov. [New approaches to modeling the ice environment during model tests of ships] Polyarnaya mekhanika. g. Vladivostok, 2016.
6. Ionov B.P., Gramuzov E.N. Ledovaya khodkost' sudov [Ice propulsion of ships]: Monografiya.– SPb.: Sudostroenie, 2001.– 512 s.x
7. Ionov B.P., Gramuzov E.N., Zuev V.A. Proektirovanie lodokolov Monografiya.– SPb.: Sudostroenie, 2013.– 512 s.
8. Nogid L.M. Modelirovanie dvizheniya sudna v sploshnom ledyanom pole i bitykh l'dakh. Sb. nauch. tr. LKI. L., 1959.- Vyp.28.- S.179-185.
9. 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.
10. Shimanskiy Yu.A. Teoriya modelirovaniya dvizheniya sudna v sploshnom ledyanom pole. Sb. nauch. tr. AANII.- L., 1960.- T.237.- S.39-29.

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

Матвей Александрович Панакушин, студент, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: panakushin921@yandex.ru

Matveu A. Panakushin, 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: panakushin921@yandex.ru

Александр Геннадьевич Ларин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: alexandr_ks1@mail.ru

Alexandr 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, 603950, Russian Federation, e-mail: alexandr_ks1@mail.ru

Кирилл Дмитриевич Блинов, аспирант кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, 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, 603950, Russian Federation, e-mail: blinov.kirill@yandex.ru

Максим Александрович Панченко, студент,
Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний
Новгород, ул. Минина, 24, e-mail:
maxp4nchenko@yandex.ru

Maxim A. Panchenko, student, Nizhny Novgorod
State Technical University, named after R.E.
Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603950,
Russian Federation, e-mail:
maxp4nchenko@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.06.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.08.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 21.08.2023.

Научная статья

УДК 629.561.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.049>

Исследование композитной модели ледяного покрова (GP-ice), составленной из одного слоя гранул сферической формы диаметром 20 мм

А.С. Себин¹ SebinAndrei@gmail.com, К.Д. Блинов¹ blinov.kirill@yandex.ru,Ю.А. Двойченко¹ edbas2@yandex.ru¹Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева

Аннотация. Данная статья посвящена вопросам физического моделирования разрушения ледяного покрова с помощью композитного льда (GP-ice) при проведении испытаний по буксировке моделей судов в ледовом опытовом бассейне. Рассматривался вариант конструкции композитной модели, составленной из одного слоя гранул сферической формы диаметром 20 мм из полиэтилена высокого давления. Приведены результаты экспериментов по разрушению модельного поля в виде характеристик диаграмм разрушения (график в осях «сила-прогиб») при различных схемах нагружения льда: центральный пролом, прокладка канала. Эти данные были представлены как степенные зависимости относительно глубины проморозки гранул. На основе метода функционального подобия проведено их сопоставление с результатами крупномасштабных опытов по разрушению натурального льда. Его суть заключается в том, что моделирование ледяного покрова производится не с позиций подобия материалов натурального и лабораторного льда, а с точки зрения функции льда как препятствия на пути следования судна, на преодоление которого оно должно затратить подобное количество энергии. Диаграмма разрушения используется как способ измерения этих затрат. В результате найдены условия моделирования, представляющие собой зависимости геометрического масштаба от глубины проморозки гранул. Они рассчитаны при подобии какой-либо одной из характеристик диаграммы разрушения (энергии или максимального проломного усилия) в соответствующем типе опыта одновременно с подобием толщины ледового поля. Эти зависимости, представленные в виде кривых, не совпадают друг с другом, что исключает полное подобие диаграммы разрушения исследовавшегося варианта модельного льда. Дальнейшие исследования композитной модели должны быть сосредоточены на проверке возможности физического моделирования ледовой ходкости судов при частичном подобии диаграммы разрушения ледяного покрова.

Ключевые слова: лёд, ледокол, модельные испытания, модель льда, композитная модель, физическое моделирование, опытовый бассейн, разрушение льда, ледяной покров, ледовая ходкость

Финансирование: Представленные исследования выполнены при финансовой поддержке РФФ в рамках проекта научных исследований № 22-19-00376 «Экспериментально-теоретическое исследование полуэмпирических моделей взаимодействия судов со льдом».

Для цитирования: Себин А.С., Блинов К.Д., Двойченко Ю.А. Исследование композитной модели ледяного покрова (GP-ice), составленной из одного слоя гранул сферической формы диаметром 20 мм Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 3, С. 94—105. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.049

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.049>

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

Andrei S. Sebin¹ SebinAndrei@gmail.com, Kirill D. Blinov¹ blinov.kirill@yandex.ru,Yuri A. Dvoichenko¹ edbas2@yandex.ru¹Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev

Abstract. This paper discusses the issues of physical modeling of the ice cover destruction using composite model ice (GP-ice) during model tests of ships in the ice testing tank. A design variant of a composite model composed of a single layer of spherical granules with a diameter of 20 mm made of high-pressure polyethylene was considered. The results of experiments on the destruction of the model field are presented in the form of characteristics of destruction diagrams (graph in the "force-bending" axes) for various ice loading schemes: central break, channel laying. These data were presented as power-law dependences with relation to the freezing depth of granules. Based on the functional similarity method, their comparison with the results of large-scale experiments on the destruction of natural ice was carried out. Its essence consists in the fact that the modeling of the ice cover is carried out not from the standpoint of the similarity of materials of full-scale and laboratory ice, but from the standpoint of the function of ice as an obstacle in the path of the vessel, to overcome which it must spend a similar amount of energy. The destruction diagram is used as a way to measure these expenses. As a result, modeling conditions are found, representing the geometric scale dependences on the depth of the granules freezing. They are calculated with the similarity of any one of the characteristics of the destruction diagram (energy or maximum breaking force) in the corresponding type of experiment simultaneously with the similarity of the thickness of the ice field. These dependences, presented in the form of curves, do not coincide with each other, which excludes the complete similarity of the destruction diagram of the studied version of the model ice. Further studies of the GP-ice should focus on testing the possibility of physical modeling of the ice propulsion of ships with a partial similarity of the destruction diagram of the ice cover.

Key words: ice, icebreaker, model tests, ice model, composite model, GP-ice, physical modeling, towing tank, ice model basin, ice destruction, ice cover, ice propulsion

Financial Support: The presented studies were carried out with the financial support of the RSF in the research project No. 22-19-00376 "Experimental and theoretical investigation of semi-empirical models of the ships interaction with ice".

For citation: 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. № 3 part 3, P. 94—105. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.049

Введение

В настоящее время доминирующим способом исследования ледовых качеств судов, дающим наиболее надёжные результаты, является физический модельный эксперимент. Современные ледовые опытовые бассейны представляют собой сложные инженерные сооружения, оснащённые мощным холодильным оборудованием, имеющие значительные размеры чаши [1]. Стоимость получения одной экспериментальной точки в таких условиях на порядки превышает стоимость проведения эксперимента в обычном неледовом бассейне, а точность измеряемого при этом буксировочного сопротивления оказывается значительно ниже. Это серьёзно ограничивает возможности исследователей и проектантов в поиске наиболее энергоэффективных форм корпусов судов, удорожает проектирование на начальном этапе.

Комплексное решение этой проблемы лежит как в области усовершенствования методов проведения испытаний и в поиске новых материалов модели ледяного покрова, которые позволили бы проводить исследования в бассейне с меньшими размерами чаши и, предпочтительно, в условиях естественного холода, так и в разработке новых методов моделирования льда, позволяющих улучшить прогностическую способность эксперимента.

1. Моделирование разрушения ледяного покрова при движении судна в сплошных льдах

Перед началом проведения эксперимента изготавливается модель, поверхность корпуса которой должна быть геометрически подобна натурному судну в масштабе λ , в опытовом бассейне намораживается ледовое поле, толщина которого также должна быть в λ раз ниже толщины натурального льда, в котором необходимо определить сопротивление движению судна.

Классическая теория моделирования ледяного покрова представляет натурный лёд как абсолютно упругое тело, деформации которого вплоть до момента разрушения подчиняются закону Гука, а его напряжённо-деформированное состояние (НДС) с достаточной для практики точностью описывается уравнением равновесия упруго деформированного тела [2]. При таком подходе физическое подобие ледяного покрова будет реализовано в том случае, если удастся подобрать абсолютно упругий материал модели, НДС которого может быть описано этим же уравнением. Тогда условия моделирования могут быть получены с помощью основных теорем теории подобия [3]. Этот подход может быть определён как «моделирование, основанное на подобии материалов» [4]. В этом случае силы упругости, возникающие при деформации натурального льда, должны моделироваться силами упругости лабораторного материала при подобных

деформациях. Для того, чтобы эти силы были механически подобны, модуль упругости и предел прочности должны быть уменьшены в λ раз по сравнению с натурными значениями [5]. С практической точки зрения для этого необходимо подобрать такой материал модели льда, который при удовлетворении всех прочих условий позволял бы гибко и независимо варьировать тремя параметрами: толщиной, модулем упругости, пределом прочности на изгиб.

Практически поиск такого материала, который удовлетворял бы всем обозначенным требованиям при проведении серии испытаний с изменением толщины льда, встретил значительные трудности и окончательно эта задача не решена вплоть до настоящего дня. Точность прогноза величин ледового сопротивления в проводимых в настоящее время модельных испытаниях остаётся невысокой, что вынуждает исследователей пользоваться специальными методиками корректировки получаемых данных [6].

Этот подход является традиционным в изучении работы различных конструкций под нагрузкой с помощью физического моделирования [7]. Как правило, в данном случае исследователей интересует момент наступления предельного состояния, а также характер разрушения, оцениваемый визуально. Подобие НДС требуется выполнять только лишь до появления первых признаков процесса разрушения (трещин, пластических деформаций), а поведение конструкции после потери эксплуатационных качеств не рассматривается. Задачам таких экспериментальных исследований в полной мере отвечают методы моделирования, основанные на подобии деформации материалов [4].

В противоположность этому разрушение льда является одновременно и обязательным следствием движения ледокола, и исследуемым требованием для проектируемого корпуса. Оно происходит непрерывно в различных районах обшивки. Моделируемая работа судна не ограничивается наступлением предельного состояния ледяного покрова, а охватывает все стадии его разрушения, вплоть до взаимодействия с обломками. В итоге для физического моделирования ледовой ходкости судна критически важным будет не только обеспечение подобия механической работы деформирования ледяной пластины до наступления первых трещин, но и остального процесса разрушения при движении судна, включая растрескивание и выворачивание обломков.

Вопрос о подобии процесса разрушения льда никак не затрагивается применяемыми в настоящее время методиками. Используемый в качестве тестового опыта облом ледовой клавиши разработан в рамках подхода, основанного на использовании упругоподобных материалов. При проведении этого

опыта считается, что балка под нагрузкой деформируется в основном упруго до достижения предельного состояния, после чего в заделке возникает трещина и образец отделяется от основного массива льда, что соответствует превышению «предела прочности на изгиб».

Однако, как показывают многочисленные натурные исследования [8–10], в которых производилось «глобальное» разрушение ледяного покрова, аналогичное тому, что происходит при движении судна, в процессе нагружения во льду возникает сложная система кольцевых и радиальных трещин. Разделённый трещинами лёд образует ледовые блоки, которые начинают взаимодействовать друг с другом, а финальный акт разрушения связан со смятием их краёв и выворачиванием ближайших к нагрузке блоков, покрывающихся по свидетельствам экспериментаторов бесчисленным количеством локальных трещин [8]. Кроме этого, исследователям натурального льда известно явление, называемое масштабным эффектом, представляющее собой фиксируемое в опытах различие между прочностными параметрами образцов льда различных размеров [11; 12]. Оно наблюдается у многих хрупких материалов [4]. Очевидно, что моделирование этого эффекта должно быть краеугольным камнем метода, основанного на подобии разрушения малых образцов, но это не учитывается современными методиками.

Таким образом, опыт по облому ледовой балки-клавиши является по своей сути моделью разрушения ледяного покрова, лишь упрощённо характеризующей движение судна в сплошных льдах. Игнорирование особенностей процесса разрушения натурального ледяного покрова, а также неучёт масштабного эффекта не позволяют современным физическим моделям достичь достаточного для практики уровня прогнозирования ледового сопротивления судна без корректировки результатов испытаний. В отсутствие достоверного описания физической природы масштабного эффекта, а также методов его моделирования, единственным путём, позволяющим избежать появляющихся неточностей, является переход к крупномасштабным испытаниям ледяного покрова как натурального, так и модельного при проведении тестовых опытов.

Разрушение ледяного покрова является сложным механическим явлением. Построение математической модели, учитывающей не только магистральное трещинообразование, но и смятие берегов трещин, выворачивание обломков, локальное растрескивание и дальнейшее поведение «продуктов» этого разрушения, а также их влияние на весь процесс в целом сопряжено с большими трудностями и не выполнено до сих пор. Также не разработано математическое описание разрушения лабораторного льда. В результате оказывается невозможным определить критерии подобия процесса разрушения ледяного покрова судном, используя методы, основанные на общности уравнений.

Альтернативный подход к определению условий моделирования был предложен в статье В. Б. Беякова [13] посвящённой исследованию композитной модели льда. В ней параметры

модельного поля для проведения испытаний были получены не на основе анализа уравнений, а из подобия силы и энергии, необходимых для полного пролома ледяного покрова в опыте «центральный пролом» (приложение усилия к ненарушенному ледовому полю). Таким образом, модель льда настраивалась не по параметрам материала, а по её способности оказывать сопротивление внешней нагрузке. Первые шаги к теоретическому обоснованию этого подхода, основанные на принципе функционального подобия, приведены в [14].

Функциональное подобие нашло своё применение в физическом моделировании в тех случаях, когда по какой-либо причине нет возможности изготовить такую модель конструкции или схемы, которая отвечала бы всем требуемым критериям, либо возникают трудности с их определением [15; 16]. Тогда моделируемая система представляется в виде «чёрного ящика», имеющего множества «входов» и «выходов», природа связей между которыми не раскрыта. Два чёрных ящика считаются подобными, если при подобных условиях подобны их входы и выходы. Применительно к модельным испытаниям судов во льдах в качестве чёрного ящика будем рассматривать процесс разрушения ледяного покрова, входа – воздействие судна, выхода – отклик льда. Тогда подобным будем считать такой процесс разрушения, когда при подобном воздействии судна вызывается подобная реакция ледяного покрова.

В отличие от традиционного подхода, основанного на подборе упругоподобного материала, данный способ моделирования не предполагает замену сил упругости природы силами упругости модели. Практически получается, что возникающие в натурном ледяном покрове силы при его деформации и разрушении, а также механика его разрушения в целом моделируется системой сил другой структуры или даже природы, которые в каждый отдельный момент времени могут не быть подобными натуре по отдельности, но при этом совокупный результат разрушения (затрачиваемая судном энергия и форма образующихся обломков), определяющий ледовое сопротивление судна, должен быть подобен натуре. Описанное выше несоответствие сил должно быть реализовано в испытаниях таким образом, чтобы не оказывать значительного влияния на процесс движения ледокола, что должно определяться грамотным выбором материала модели льда, а также высокой степенью инертности системы.

В качестве способа, исчерпывающе описывающего отклик льда на воздействие судна, будем рассматривать диаграммы разрушения ледяного покрова, измеренные на льду горьковского водохранилища [9]. В этих опытах нагрузка, распределённая по пренебрежимо малой площади, прикладывалась последовательно к кромке ледового поля, образовавшейся после пролома льда в предыдущем опыте, что наиболее приближено к работе ледокола. Зависимость параметров диаграмм разрушения от толщины льда представима в степенном виде. В случае, если аналогичные параметры модельного льда могут быть также описаны степенными уравнениями, то функцию

подобия, представляющую собой условие моделирования, необходимо искать в виде [14]:

$$\lambda = \left(\frac{K_n}{K_m} \cdot h_m^{n-m} \right)^{\frac{1}{q-1}} \quad (1)$$

где λ – геометрический масштаб моделирования; h_m – толщина модельного льда; q – степень λ в соответствующем механическом масштабе моделирования, для которого ведётся расчёт функции ($q = 4$ для работы, $q = 3$ для сил, $q = 0,5$ для скоростей и т.д.); n и m – степени в соответствующих аппроксимационных зависимостях степенного вида натуре и модели соответственно; K_n и K_m – коэффициенты в этих зависимостях. Поиск этого выражения представляет собой исследовательскую задачу при разработке новых функционально подобных моделей ледяного покрова.

2. Экспериментальное исследование процесса разрушения композитной модели ледяного покрова

В качестве материала модели ледяного покрова рассмотрим композитную модель (GP-ice), представляющую собой шаровые гранулы полиэтилена высокого давления, замороженные в пресноводный лёд. Он позволяет очень гибко настраивать процесс разрушения, варьируя различными параметрами: диаметром и формой гранул, количеством их слоёв, глубиной проморозки. Разрушение этого материала ранее исследовалось В. Б. Беляковым [17; 18], однако им рассматривался только один вариант конструкции (рис. 1а) – гранулы диаметром 3 мм, уложенные в несколько слоёв с неполной проморозкой. Она показала себя потенциально приемлемой для моделирования статического процесса разрушения, однако масса получаемых при этом обломков не была подобна натуре, т. к. при их поворачивании не замороженные слои гранул отделялись от основного массива и расплывались в разные стороны, что кардинальным образом отличалось от феноменологии натурального процесса. Другой, более перспективный вариант модели (рис. 1б) – шаровые гранулы большего диаметра, уложенные в один слой, промороженные тонким естественным льдом, не рассматривался.

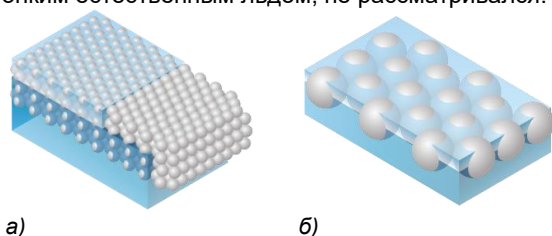


Рис. 1 Композитная модель, состоящая из: а) – нескольких не полностью промороженных слоёв мелких гранул; б) – одного слоя крупных гранул, промороженных тонким естественным льдом

Для того, чтобы установить взаимосвязи между композитной моделью и натурным льдом используя метод функционального подобия, необходимо

произвести опыты на модельном льду, аналогичные опытам на натуре [9].

Эксперименты проводились в малом ледовом опытовом бассейне НГТУ, установленном в термокамере (рис. 2). Нагрузка на лёд создавалась при помощи линейного электропривода со скоростью 4 мм/с. На силовом нагружающем устройстве было смонтировано измерительное оборудование, позволяющее фиксировать прикладываемую ко льду нагрузку и перемещение штока. Затем полученные данные обрабатывались в специально разработанной компьютерной программе, в результате получался график в осях «сила-прогиб», называемый «диаграмма разрушения»:

$$F = f(w) \quad (2)$$



Рис. 2. Общий вид лабораторной установки

Опыты производились по различным схемам (рис. 3, рис. 4), которые могут быть сгруппированы по принципу последовательности приложения усилия: центральный пролом (приложение нагрузки к неразрушенному полю, 1 и 2 на рис. 4), первый опыт по прокладке канала (приложение усилия к кромке льда, полученной после центрального пролома, 3 и 6 на рис. 4.), второй опыт по прокладке канала (приложение усилия к кромке, полученной после первого опыта по прокладке канала, 4 и 7 на рис. 4) и т. д. Из-за ограничений, накладываемых длиной бассейна, разрушение льда по схеме прокладки канала осуществлялась не более трёх раз в рамках одной серии опытов, на одном ледовом поле производилось не более двух серий.



Рис. 3. Проведение опыта по разрушению композитной модели ледяного покрова

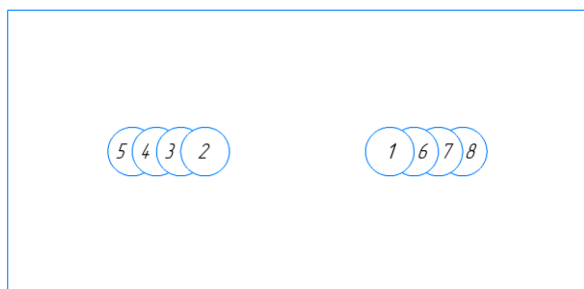


Рис. 4. Схема приложения нагрузки к ледовому полю

Разрушение натурального ледяного покрова связано с образованием большого количества свободных поверхностей трещин, вызванных не только изгибом, но и сжатием ледяных блоков за счёт «арочного эффекта» [19–21], на что затрачивается большое количество энергии. В отличие от этого гранулы вызывают торможение трещин и препятствуют их распространению в композитной ледяной пластине. Работа, затрачиваемая на разрушение композитной модели, оказывается меньше за счёт уменьшения свободных поверхностей трещин и уменьшения толщины намораживаемого слоя льда между гранулами.

Анализ форм диаграмм разрушения, зарегистрированных в опытах, показал, что они состоят из двух частей (рис. 5). Первая из них (левая, докритическая) имеет восходящий характер, т.е. происходит увеличение нагрузки при увеличении прогиба. При достижении нагрузкой глобального максимума (критического значения) характер диаграммы изменяется — вторая часть (правая, закритическая) имеет нисходящий вид.

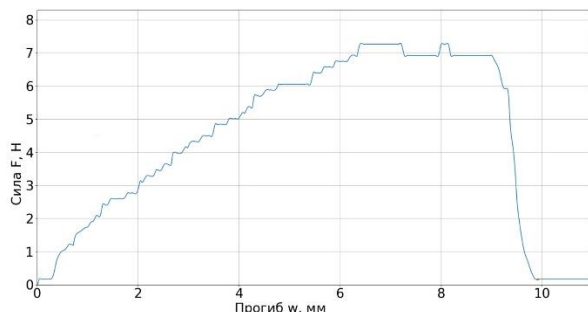


Рис. 5 Типичный вид диаграммы разрушения

Начало диаграммы в некоторых случаях имело очень небольшой (0,5–1 мм) участок близкий к вертикали, что можно было объяснить взаимодействием опоры, действующей на лед (индентора), с выступающими из льда гранулами. Далее связь между прогибом льда и прикладываемым усилием становилась наклонной и явно линейной, что свидетельствовало о справедливости закона Гука для композитной модели при малых прогибах. Это свойство позволяет оценить модуль деформации неразрушенного композитного ледяного покрова с использованием формулы Герца для изгиба бесконечной пластины на упругом основании [5]. Принимая коэффициент Пуассона таким же, как у натурального льда, получено, что определяемый таким образом модуль деформации имел значение меньшее, чем у натурального льда без гранул, определяемый на основании аналогичных опытов в том же бассейне.

После этого с увеличением прогиба идёт возрастание нагрузки, сопровождающееся хрупким разрушением объёма льда между гранулами, а также разрушением адгезионного соединения полиэтилена и льда. Как показали исследования [22], его прочность ниже, чем предел прочности льда на изгиб. Поэтому можно предположить, что разрушение соединения гранул и льда происходит раньше, чем разрушение ледяного массива в рассматриваемой области.

Это объясняет суть механизма снижения прочности композитной модели в сравнении с тонким пресноводным льдом без гранул. Здесь прочность адгезионного соединения полиэтилена и льда как бы заменяет собой изгибную прочность льда в некоторых точках ледового поля. Образование трещин в таком случае протекает по наикратчайшему пути между гранулами и представляет собой разрушение ледовых перемычек между гранулами. Это также можно было наблюдать на видеозаписи эксперимента. С возрастанием нагрузки зона хрупкого разрушения удаляется на периферию от точки приложения силы.

После достижения максимального (критического) значения нагрузки, благодаря кинематическому способу нагружения (постоянное перемещение штампа с фиксацией усилия) была получена запись закритической части диаграммы. Она отличалась большим разнообразием форм, чем докритическая, что свидетельствует о более значительной хаотичности процесса разрушения на этом этапе.

3. Анализ результатов

В результате проведения экспериментов были получены диаграммы разрушения композитной модели ледяного покрова. Они отличались существенным разнообразием форм, которое потребовало применения специальной методики, использующей различные характеристики, позволяющие сопоставлять полученные графики между собой, а также с диаграммами разрушения натурального льда. Требовалось использовать такие параметры, которые позволили бы выделить и оценить в том числе качественную сторону процессов разрушения ледяного покрова (натурного и модельного), составляющую их общность.

Для этого был использован подход, применявшийся ранее при анализе параметров диаграмм разрушения натурального льда [5; 14; 21]. Сначала определялись следующие основные характеристики, выделяющие характерные элементы диаграммы, которые подлежали дальнейшему анализу:

- максимальное (критическое) усилие F_{cr} , получаемое с диаграммы;
- критический прогиб w_{cr} , при котором достигается критическое усилие;
- максимальный прогиб w_{max} , когда усилие становится равным нулю;
- закритический прогиб (длина закритической части диаграммы, определяемая как разница максимального и критического прогибов

$$w_{supcr} = (w_{max} - w_{cr}) \quad (3)$$

После этого рассматривались характеристики, имеющие энергетическую природу. Для более подробной детализации площадь диаграммы была разделена на две части – до и после критического прогиба:

- критическая работа разрушения (площадь докритической части диаграммы):

$$A_{cr} = \int_0^{w_{cr}} F dw; \quad (4)$$

- закритическая работа разрушения (площадь закритической части диаграммы):

$$A_{supcr} = \int_{w_{cr}}^{w_{max}} F dw; \quad (5)$$

- полная работа разрушения (площадь всей диаграммы разрушения):

$$A_{tot} = A_{cr} + A_{supcr} = \int_0^{w_{max}} F dw; \quad (6)$$

- коэффициент формы (полноты) критической части диаграммы разрушения:

$$K_{cr} = \frac{A_{cr}}{F_{cr} w_{cr}}; \quad (7)$$

- коэффициент формы (полноты) закритической части диаграммы разрушения:

$$K_{supcr} = \frac{A_{supcr}}{F_{cr} (w_{max} - w_{cr})}; \quad (8)$$

- коэффициент формы (полноты) всей диаграммы разрушения:

$$K_{tot} = \frac{A_{tot}}{F_{cr} w_{max}}; \quad (9)$$

- отношение критической работы разрушения к общей работе разрушения (показывает вклад критической работы разрушения в общие энергетические затраты на разрушение льда):

$$K_{A/A} = \frac{A_{cr}}{A_{tot}}. \quad (10)$$

Эти 11 характеристик определялись для каждой из диаграмм разрушения, полученных во всех опытах для всех схем разрушения ледяного покрова (центральный пролом, первый опыт по прокладке канала, второй опыт, третий опыт), площадь диаграммы вычислялась по методу трапеций.

Полученные характеристики ставились в соответствие с глубиной проморозки гранул h_{fr} , при этом каждая схема проведения эксперимента рассматривалась отдельно. На рис. 1 они приведены для экспериментов по схеме «центральный пролом».

Получившиеся группы данных были аппроксимированы зависимостями степенного вида.

Получено, что для всех схем проводившихся опытов наибольшей стабильностью параметров обладает докритическая (левая) часть диаграмм (рис. 6а, рис. 6б, рис. 6г, рис. 6ж). Наиболее хаотизированным является завершающий этап процесса разрушения, характеризующийся спадом нагрузки, что выражается в более значительном разбросе параметров закритической (правой) части диаграмм (рис. 6д, рис. 6л, рис. 6м). Это связано со случайным характером процесса выворачивания обломков, а также их взаимодействия между собой после потери ледяным покровом несущей способности.

Также обращает на себя внимание инвариантность коэффициентов формы докритической части, а также всей диаграммы разрушения (рис. 6ж, рис. 6и) относительно глубины проморозки гранул. Их значение изменялось только при изменении схемы проведения опыта. Такое же поведение коэффициентов формы наблюдалось при обработке результатов экспериментов по разрушению натурального льда [9], когда была выявлена их независимость от толщины ледового поля. При этом, если у натурального льда коэффициенты формы были равны $K_{cr} = 0,577$, $K_{tot} = 0,531$, то у композитной модели $K_{cr} = 0,77$, $K_{tot} = 0,71$, что говорит о большей полноте диаграмм и, следовательно, больших энергетических затратах на подобный прогиб при подобной величине критического усилия.

Коэффициент отношения работ $K_{A/A}$ (рис. 7к)

имеет тенденцию к росту, в отличие от натурального льда (у которого оно в среднем постоянно, а разброс значений при центральном проломе лежит в пределах $0,6 \div 0,85$), однако, это может быть связано с влиянием стенок бассейна. Исходя из полученных данных можно заключить, что рассматривавшийся вариант композитной модели ледяного покрова имеет схожее с натурой распределение энергетических затрат по участкам диаграммы при глубинах проморозки до 6 мм.

Силовая характеристика диаграммы разрушения (критическое усилие F_{cr} , рис. 6а) характеризуется малым разбросом значений, а также устойчивой тенденцией к росту с увеличением глубины проморозки для всех рассмотренных схем разрушения ледяного покрова. Такую же оценку

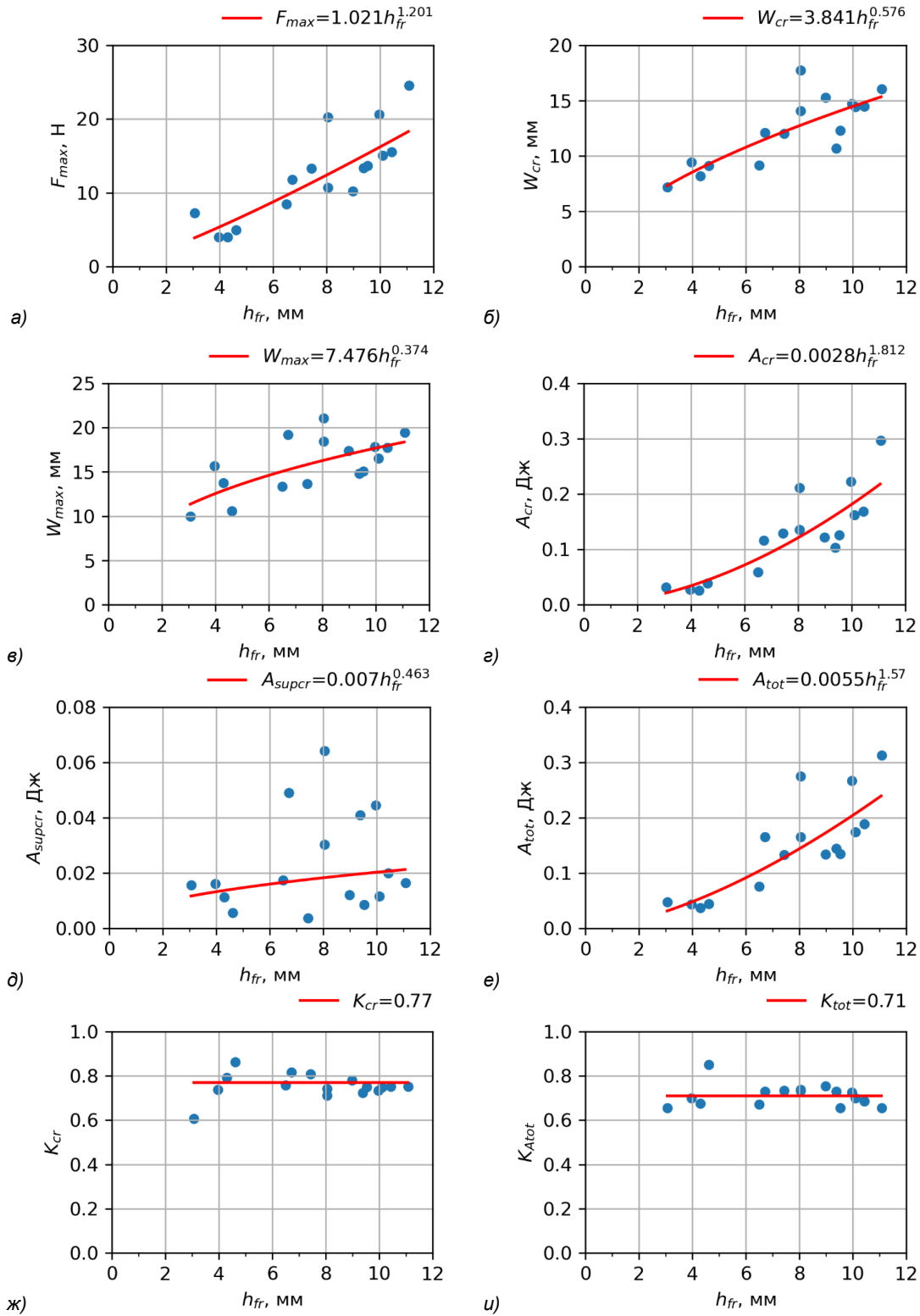
о При физическом подобии разрушения ледяного покрова рассмотренные характеристики должны быть подобны натуре в масштабах:

$$\lambda = \frac{h_n}{h_m} = \frac{w_n}{w_m}; \lambda^3 = \frac{F_n}{F_m}; \lambda^4 = \frac{A_n}{A_m}; k = idem, \quad (11)$$

а
т
ь

п
о
л
н
о
й

р
а
б
о
т



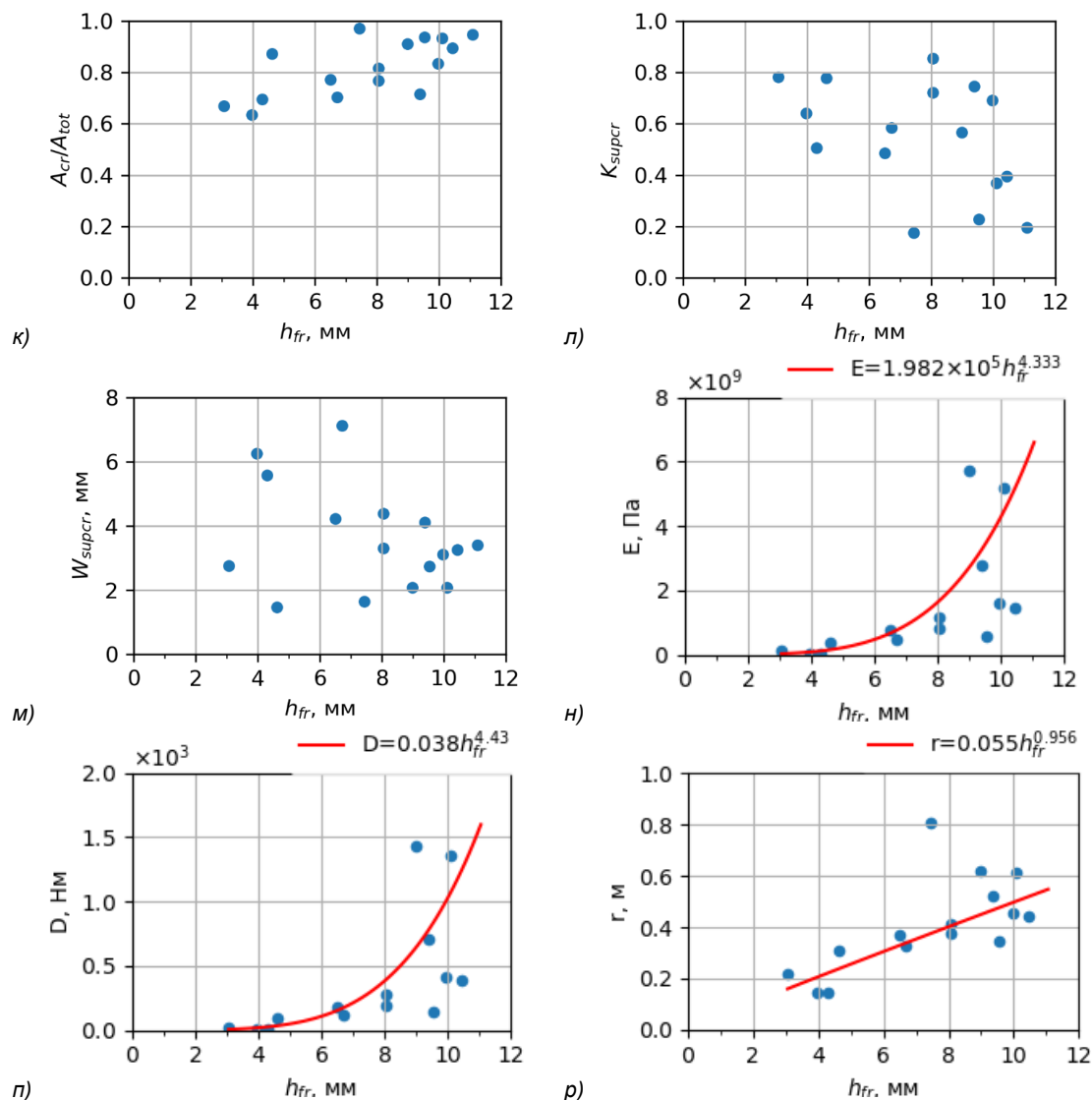


Рис. 2. Параметры диаграмм разрушения композитной модели льда, составленной из полиэтиленовых гранул сферической формы $\varnothing 20$ мм, уложенных в 1 слой, полученных при центральном проломе: а) – максимальная сила; б) – критический прогиб; в) – максимальный прогиб; г) – критическая работа разрушения; д) – работа за критического этапа процесса разрушения; е) – общая работа разрушения; ж) – коэффициент формы критической части диаграммы разрушения; з) – коэффициент формы всей диаграммы разрушения; к) – вклад критической работы разрушения в общий процесс; л) – коэффициент формы за критической части диаграммы; м) – длина за критической части диаграммы; н) – модуль упругости; п) – цилиндрическая жесткость; р) – характерный линейный размер

4. Определение условий моделирования

В результате проведения экспериментов получены данные, характеризующие размеры и форму диаграмм разрушения при различных схемах нагружения ледового поля. Их анализ позволил выделить эмпирические зависимости, носящие степенной характер и связывающие энергию и силу, необходимые для разрушения композитного ледяного покрова, с глубиной проморозки гранул. В этом случае вид условий моделирования может быть определен как (1). Принимая в качестве натурных данных результаты опытов [9], получим значения геометрического масштаба, рассчитанные для случая подобия силовых и энергетических характеристик диаграммы разрушения – F_{cr} и A_{tot} –

в каждом типе проведенного опыта (в соответствии с (11)). Эти зависимости приведены на рис. 7, получили название «функции подобия» или «кривые подобия». Они иллюстрируют способность композитной модели имитировать силовые и энергетические затраты на разрушение натурального льда в соответствующем масштабе моделирования.

Следует отметить, что одно из основных требований при построении этих кривых – геометрическое подобие толщины натурального и модельного льда – заложено в структуре формулы (1) и выполняется автоматически при её использовании. Тем не менее, конструкция исследовавшегося варианта композитной модели (рис. 1б) не позволяет обеспечить подобие формы модельного поля по толщине. Однако, метод функционального подобия позволяет

моделирование без подобия формы если во всех значимых точках модели функционалы систем подобны. В данном случае для моделирования составляющей сопротивления движению в обломках необходимо подобие объёма и плотности модели льда. Второе обеспечивается плотностью полиэтилена, который имеет её равной 0,919. В качестве параметра, определяющего объём композитной модели, использовалась приведённая толщина, представляющая собой отношение объёма модельного льда в бассейне к площади его зеркала, которая затем использовалась в качестве h_m при определении условий моделирования (1). Она рассчитывалась из выражения:

$$h_{np} = h_f + \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left[\frac{R}{3} \left(4 + \frac{(h_1 + h_f)^3 - h_1^3}{R^3} \right) - \frac{2h_1h_f + h_f^2}{R} \right], \text{ при } h_{fr} \in [0; 2R - h_1], \quad (12)$$

где h_{fr} – глубина проморозки слоя гранул; R – радиус гранулы сферической формы; h_1 – выступающая над поверхностью льда часть гранулы. Если в качестве материала гранул используется ПВД, а жидкости – пресная вода, из которой между гранулами образуется пресноводный лёд, то эта высота может быть определена:

$$h_1 = 10^{-3} \cdot (191,2\sqrt{3} + 18,45)R \approx 349,6 \cdot 10^{-3}R \quad (13)$$

Как и параметры диаграмм разрушения, кривые подобия строились для каждой схемы проведения эксперимента отдельно: центральный пролом, 1-ый опыт по прокладке канала (3 и 6 на рис. 4), 2-ой опыт по прокладке канала (4 и 7 на рис. 4), 3-ий опыт по прокладке канала (5 и 8 на рис. 4). К сожалению, недостаточное количество данных не позволяет

получить статистически достоверные аппроксимационные функции параметров диаграммы разрушения натурального льда. Особенно ощутим недостаток этих данных для 3-его опыта по прокладке канала. Поэтому дополнительно при получении этой кривой подобия результаты опытов в композитном льду кроме аналогичной для натурального льда сравнивались также и с эмпирической функцией, полученной на основе результатов всех опытов Двойченко-Грамузова по прокладке канала. Для построения кривых использовались следующие параметры диаграмм разрушения: критическая сила F_c и общая работа разрушения A_{tot} .

Степенной характер эмпирических зависимостей натурны и модели, на основании которых строились графики (рис. 7), определил вид полученных кривых: при малых глубинах проморозки они приближаются к вертикальной оси, на более значительных – к горизонтальной.

На приведённых графиках (рис. 7) кривые подобия не совпадают друг с другом. Это говорит о практической невозможности одновременного моделирования силы и энергии разрушения ледяного покрова всех рассматривавшихся схем проведения эксперимента. В первую очередь это обусловлено физическими свойствами самой модели и выражается в разных значениях коэффициентов формы диаграмм разрушения у натурального и модельного льда. Феноменологическая картина разрушения композитного льда значительно отличается от натурального и обусловлена влиянием гранул полиэтилена. Из этого можно сделать вывод о принципиальной невозможности описания процесса разрушения натурального и композитного ледяного покрова в рамках одной математической модели и, следовательно, использования классических подходов теории моделирования для этого лабораторного льда.

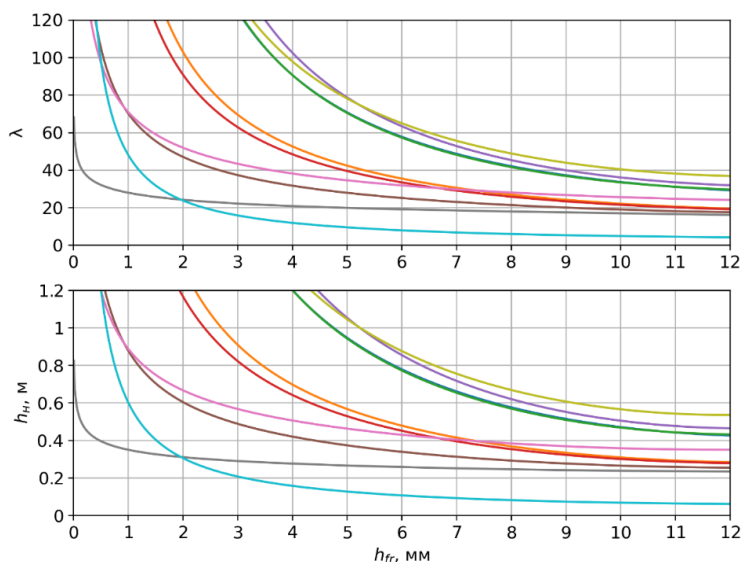


Рис. 3 – Кривые подобия композитной модели ледяного покрова, составленной из одного слоя сферических гранул диаметром 20 мм: — λ , определённая по F_{max} при центральном проломе композитной модели относительно F_{max} при центральном проломе натурального льда; — λ , определённая по A_{tot} при центральном проломе композитной модели относительно A_{tot} при центральном проломе натурального льда; — λ ,

определённая по F_{max} в 1-м опыте по прокладке канала в композитной модели относительно F_{max} в 1-м опыте по прокладке канала в натурном льду; — λ , определённая по A_{tot} в 1-м опыте по прокладке канала в композитной модели относительно A_{tot} в 1-м опыте по прокладке канала в натурном льду; — λ , определённая по F_{max} во 2-м опыте по прокладке канала в композитной модели относительно F_{max} во 2-м опыте по прокладке канала в натурном льду; — λ , определённая по A_{tot} во 2-м опыте по прокладке канала в композитной модели относительно A_{tot} во 2-м опыте по прокладке канала в натурном льду; — λ , определённая по F_{max} в 3-м опыте по прокладке канала в композитной модели относительно F_{max} в 3-м опыте по прокладке канала в натурном льду; — λ , определённая по A_{tot} в 3-м опыте по прокладке канала в композитной модели относительно A_{tot} в 3-м опыте по прокладке канала в натурном льду; — λ , определённая по F_{max} в 3-м опыте по прокладке канала в композитной модели относительно F_{max} во всех опытах по прокладке канала в натурном льду; — λ , определённая по A_{tot} в 3-м опыте по прокладке канала в композитной модели относительно A_{tot} во всех опытах по прокладке канала в натурном льду

Заключение

Проведённые экспериментальные исследования разрушения композитной модели ледяного покрова позволили получить феноменологическое описание этого процесса, дать количественные его характеристики (рис. 5). Применение методов функционального подобия теории подобия дало обоснование эмпирическому методу настройки моделей ледяного покрова, а также позволило выделить условия моделирования различных параметров ледяного покрова с помощью композитной модели (рис. 7). Однако, было выявлено, что полное подобие диаграммы разрушения ледяного покрова не может быть реализовано с помощью этого лабораторного льда, а её характеристики (сила и работа) моделируются только при различных глубинах проморозки и различных геометрических масштабах.

В настоящее время нет единого мнения о том, какой из параметров диаграммы разрушения – максимальная сила или затраченная энергия – является определяющим при движении судна. Традиционным для моделирования является силовой подход [2], однако рядом других авторов [5; 23] указывается, что наиболее правильной характеристикой ледоразрушающих средств

являются энергетические затраты. Построенные графики (рис.7) показали, что для исследовавшихся конструкций композитной модели эти параметры диаграмм не могут быть подобными натуре одновременно. Кроме этого, не установлена стандартная схема тестового опыта при проведении крупномасштабных экспериментов по полному пролому ледяного покрова (центральный пролом или прокладка канала). Всё это не даёт возможности заранее отдать предпочтение моделированию по тому или иному параметру диаграммы разрушения.

Движение судна в сплошном льду – сложный физический процесс, который может быть охарактеризован множеством различных параметров. Рассмотренный подход предлагает определять условия моделирования ледовой ходкости судна по характеристикам диаграммы разрушения ледяного покрова. К настоящему моменту не установлено какая из представленных характеристик является определяющей для процесса движения судна, а какая малозначимой. Исходя из этого, необходимо проведение испытаний по буксировке эталонных моделей ледоколов с известными значениями натурального сопротивления в композитной модели с параметрами, представленными на рис. 7

Литература

1. Wilkman G. Ice Model Tests / G. Wilkman, T. Leiviskä, R. A. Suojanen // Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering : в 6 т. – John Wiley & Sons, Ltd, 2017. – Т. 3. – С. 1-21.
2. Каштелян В. И. Сопротивление льда движению судна / В. И. Каштелян, И. И. Позняк, А. Я. Рывлин. – Л. : Судостроение, 1968. – 239 с.
3. Кирпичёв М. В. Теория подобия / М. В. Кирпичёв. – М. : Изд-во АН СССР, 1953. – 95 с.
4. Назаров А. Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел (к теории моделирования) / А. Г. Назаров. – Ереван : Изд-во АН Арм. ССР, 1965. – 218 с.
5. Ионов Б. П. Ледовая ходкость судов / Б. П. Ионов, Е. М. Грамузов. – СПб. : Судостроение, 2001. – 512 с.
6. ITTC - Recommended Procedures and Guidelines. Resistance Tests in Ice. 7.5-02-04-02.01. – ITTC, 2017.
7. Шаповалов Л. А. Моделирование в задачах механики элементов конструкций / Л. А. Шаповалов. – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с.
8. Пролом и грузоподъемность льда / П. П. Кобеко, Н. И. Шишкин, Ф. И. Марей, Н. С. Иванова // Журнал технической физики. – 1946. – Т. XVI. – № 3. – С. 273-276.
9. 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.
10. Панфилов Д. Ф. Экспериментальные исследования грузоподъемности ледяного покрова / Д. Ф. Панфилов // Известия ВНИИГ. – 1960. – Т. 64. – С. 101-115.
11. Степанюк И. А. Технологии испытаний и моделирования морского льда / И. А. Степанюк. – СПб. : Гидрометеиздат, 2013. – 78 с.

12. Опыт крупномасштабных испытаний прочности ледяных полей на изгиб в Карском море и море Лаптевых / К. А. Корнишин, В. А. Павлов, В. Н. Смирнов [и др.] // Научно-Технический Вестник ОАО "НК «Роснефть». – 2016. – № 2 (43). – С. 85-89.
13. Беляков В. Б. Исследование физико-механических свойств композитной модели льда / В. Б. Беляков // Вопросы проектирования судов, плавающих во льдах. – 1988. – С. 76-88.
14. Себин А. С. Обоснование подходов к физическому моделированию разрушения ледяного покрова в задачах исследования взаимодействия судов со льдом на основе метода функционального подобия / А. С. Себин, Ю. А. Двойченко // Транспортные системы. – 2021. – № 3 (21). – С. 28-38.
15. Ярмульник Ф. В. Методические рекомендации по исследованию строительных конструкций с применением математического и физического моделирования / Ф. В. Ярмульник, В. И. Кретов. – Киев : НИИСК, 1987. – 70 с.
16. Веников В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): учеб. пособие для вузов / В. А. Веников. – 2-е, доп. и перераб. – М. : Высшая школа, 1976. – 479 с.
17. Беляков В. Б. Новая модель льда / В. Б. Беляков // Вопросы теории, прочности и проектирования судов, плавающих во льдах: Межвузовский сборник. – 1984. – С. 48-52.
18. Зуев В. А. А. с. Способ испытания моделей судов ледового плавания / В. А. Зуев, Е. М. Грамузов, В. Б. Беляков. – 1984.
19. Двойченко Ю. А. Деформация и пролом ледяного поля / Ю. А. Двойченко // Теория и прочность ледокольного корабля: межвуз. сб. – 1980. – С. 38-44.
20. Двойченко Ю. А. К вопросу о предельной деформации ледяного покрова / Ю. А. Двойченко // Теория и прочность ледокольного корабля: межвуз. сб. – 1978. – С. 47-49.
21. 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.
22. The adhesive behavior of the polyethylene component in the «GP-ice» for studying the ice propulsion of the promising Arctic icebreakers / V. A. Zuev, Y. A. Dvoichenko, A. S. Sebin, N. M. Semenova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing Ltd, 2021. – Т. 678. – С. 012024.
23. Богородский В. В. Разрушение льда: методы, технические средства / В. В. Богородский, В. П. Гаврило, О. А. Недошивин. – Л. : Гидрометеиздат, 1983. – 232 с.

References

1. Wilkman G., Leiviskä T., Suojanen R. A. Ice Model Tests. Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering, John Wiley & Sons, Ltd, 2017, Vol. 3, P. 1-21.
2. Kashtelyan V. I., Poznyak I. I., Ryvlin A. YA. Soprotivlenie l'da dvizheniyu sudna [Ice resistance to vessel movement]. L. : Sudostroenie, 1968, 239 p.
3. Kirpichyov M. V. Teoriya podobiya [Similarity theory]. M. : Izd-vo AN SSSR, 1953, 95 p.
4. Nazarov A. G. O mekhanicheskom podobii tverdykh deformiruemykh tel (k teorii modelirovaniya) [On the mechanical similarity of solid deformable bodies (to the theory of modeling)]. Erevan : Izd-vo AN Arm. SSR, 1965, 218 p.
5. Ionov B. P., Gramuzov E. M. Ledovaya hodkost' sudov [Ice propulsion of vessels]. SPb. : Sudostroenie, 2001, 512p.
6. ITTC - Recommended Procedures and Guidelines. Resistance Tests in Ice. 7.5-02-04-02.01. ITTC, 2017.
7. SHapovalov L. A. Modelirovanie v zadachah mekhaniki elementov konstrukcij [Modeling in problems of structural elements mechanics]. M. : Mashinostroenie, 1990, 288 p.
8. Kobeko P. P., SHishkin N. I., Marej F. I., Ivanova N. S. Prolom i gruzopod'emnost' l'da [Ice break and its load capacity]. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki, 1946, Vol. XVI, N 3, P. 273-276.
9. Zuev V. A., Gramuzov E. M., Dvojchenko YU. A. Eksperimental'nye issledovaniya razrusheniya ledyanogo pokrova [Experimental studies of the the ice cover destruction]. Voprosy teorii, prochnosti i modelirovaniya sudov, plavayushchih vo l'dah: mezhvuz. sb. 1984, P. 4-13.
10. Panfilov D. F. Eksperimental'nye issledovaniya gruzopod'emnosti ledyanogo pokrova [Experimental studies of the ice cover carrying capacity]. Izvestiya VNIIG, 1960, Vol. 64, P. 101-115.
11. Stepanyuk I. A. Tekhnologii ispytaniy i modelirovaniya morskogo l'da [Sea ice testing and modeling technologies]. SPb. : Gidrometeoizdat, 2013, 78 p.
12. Kornishin K. A., Pavlov V. A., Smirnov V. N. [et al.] Opyt krupnomasshtabnykh ispytaniy prochnosti ledyanykh poley na izgib v Karskom more i more Laptevyyh [Experience of large-scale bending strength tests of ice fields in the Kara Sea and the Laptev Sea]. Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik ОАО "НК «Rosneft'», 2016, N 2 (43), P. 85-89.
13. Belyakov V. B. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv kompozitnoy modeli l'da [Investigation of the physico-mechanical properties of the composite ice model]. Voprosy proektirovaniya sudov, plavayushchih vo l'dah, 1988, P. 76-88.
14. Sebin A. S., Dvojchenko YU. A. Obosnovanie podhodov k fizicheskomu modelirovaniyu razrusheniya ledyanogo pokrova v zadachah issledovaniya vzaimodeystviya sudov so l'dom na osnove metoda funktsional'nogo podobiya [Substantiation of approaches to the physical modeling of the ice cover destruction in the tasks of studying the interaction of ships with ice based on the functional similarity method]. Transportnye sistemy, 2021, N 3 (21), P. 28-38.
15. YArmul'nik F. V., Kretov V. I. Metodicheskie rekomendatsii po issledovaniyu stroitel'nykh konstrukcij s primeneniem matematicheskogo i fizicheskogo modelirovaniya [Methodological recommendations for the study of building structures using mathematical and physical modeling]. Kiev : NIISK, 1987, 70 p.
16. Venikov V. A. Teoriya podobiya i modelirovaniya (primenitel'no k zadacham elektroenergetiki): ucheb. posobie dlya vuzov [The theory of similarity and modeling (in relation to the problems of the electric power industry): a textbook for universities]. M. : Vysshaya shkola, 1976, 479 p.

17. Belyakov V. B. Novaya model' l'da [A new Ice model]. Voprosy teorii, prochnosti i proektirovaniya sudov, plavayushchih vo l'dah: Mezhdvuzovskij sbornik, 1984, P. 48-52.
18. Zuev V. A., Gramuzov E. M., Belyakov V. B. A. s. Sposob ispytaniya modelej sudov ledovogo plavaniya [Copyright certificate. Method of testing models of ice navigation vessels]. 1984.
19. Dvojchenko YU. A. Deformaciya i prolom ledyanogo polya [Deformation and break of the ice field]. Teoriya i prochnost' ledokol'nogo korablya: mezhvuz. sb., 1980, P. 38-44.
20. Dvojchenko YU. A. K voprosu o predel'noj deformacii ledyanogo pokrova [On the issue of the ultimate deformation of the ice cover.]. Teoriya i prochnost' ledokol'nogo korablya: mezhvuz. sb., 1978, P. 47-49.
21. Zuev V. A., Gramuzov E. M., Dvojchenko Yu. A. Razrushenie ledyanogo pokrova [The ice cover destruction]. Gor'kij : NTO im. akad. A. N. Krylova, Volzhsko-Kamskoe MOP, 1989, 86 p.
22. Zuev V. A., Dvojchenko Y. A., Sebin A. S., Semenova N. M. The adhesive behavior of the polyethylene component in the «GP-ice» for studying the ice propulsion of the promising Arctic icebreakers. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing Ltd, 2021, Vol. 678, P. 012024.
23. Bogorodskij V. V., Gavrilov V. P., Nedoshivin O. A. Razrushenie l'da: metody, tekhnicheskie sredstva [Ice destruction: methods, technical means]. L. : Gidrometeoizdat, 1983, 232 p.

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

Андрей Сергеевич Себин, ассистент кафедры кораблестроения и авиационной техники, Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева (НГТУ), 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail:

Andrei S. Sebin, Assistant of 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

Кирилл Дмитриевич Блинов, аспирант кафедры Кораблестроения и авиационной техники, Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева (НГТУ), 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail:

Kirill D. Blinov, graduate student of 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: blinov.kirill@yandex.ru

Юрий Александрович Двойченко, 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

Yuri A. Dvojchenko, Ph.D. (Eng), assistant professor of 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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.07.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.08.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 20.08.2023.

Научная статья

УДК 622.242.4:539.374

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.050>**Рациональное конструирование гидроразжимных соединений свай с основаниями ледостойких стационарных платформ**Г.Б. Крыжевич^{1,2} g_kryzhevich@ksrc.ru¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург,²Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург

Аннотация. В работе анализируются конструктивно-технологические решения для узлов соединения свай со специальными элементами опорных конструкций ледостойких морских стационарных платформ (МСП) — с гильзами. Попытки создать такие неподвижные соединения при больших диаметрах и толщинах стенок свай часто сопровождаются появлением трещин при гидравлическом разжиге свай, благодаря которому формируется соединение. Цель работы состоит в поиске рациональной конструкции гидроразжимного соединения, обеспечивающего его бездефектное изготовление и высокую работоспособность при эксплуатации МСП. Цель достигается на основе численного конечно-элементного моделирования технологического процесса гидравлического разжиге свай, связанного с одновременным деформированием гильз, неподвижно соединенных с основанием МСП. Проверка работоспособности соединения выполняется путем конечно-элементного моделирования процесса вытягивания сваи из гильзы. При этом контролируется зависимость осевого усилия вытягивания от взаимного осевого смещения сваи и гильзы, на основе которой делается вывод об эксплуатационной надежности соединения на базе опыта многолетнего использования подобной технологии гидроразжиге. Анализ полученных результатов говорит о наличии большого числа факторов, влияющих на надежность и технологичность соединения. К таким факторам относятся максимальное давление рабочей жидкости при гидроразжиге, модуль пластического упрочнения материала сваи и большой ряд конструктивных особенностей гидроразжимного соединения.

Ключевые слова: морские стационарные платформы, конструкции морских стационарных платформ, сваи, численное моделирование, метод конечных элементов, пластическое деформирование

Для цитирования: Крыжевич Г.Б. Рациональное конструирование гидроразжимных соединений свай с основаниями ледостойких стационарных платформ, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 3, С. 106—111. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.050

Original articleDOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.050>**Rational design of hydro-flassable connections of piles with the bases of ice-resistant stationary platforms**Gennady B. Kryzhevich^{1,2} g_kryzhevich@ksrc.ru¹ State marine technical university of Saint-Petersburg, ²Baltic State Technical University "Voenmeh" D.F. Ustinov

Abstract. The paper analyzes design and technological solutions for the joints of piles with special elements of the supporting structures of ice-resistant fixed offshore platforms - with sleeves. Attempts to create such immovable connections at large diameters and wall thicknesses of piles are often accompanied by the appearance of cracks caused by hydraulic expansion of the piles, due to which the connection is formed. The purpose of the work is to find a rational design of a hydro-detachable connection that ensures its defect-free manufacture and high efficiency during the operation of platforms. The aim of the work is to find a rational design of a hydraulic expansion joint that ensures defect-free production of joints and their high performance in the operation of platforms. The goal is achieved on the basis of numerical finite element modeling of the technological process of hydraulic unclamping of piles associated with the simultaneous deformation of guides (sleeves) fixedly connected to the base of the platforms. The connection performance is checked by finite element modeling of the process of pulling the pile out of the sleeve. At the same time, the dependence of the axial pulling force on the mutual axial displacement of the pile and the sleeve is controlled, on the basis of which a conclusion is made about the operational reliability of the joint based on the experience of many years of using such a hydraulic expansion technology. Analysis of the obtained results indicates the presence of a large number of factors affecting the reliability and manufacturability of the connection. These factors include the maximum pressure of the working fluid during hydraulic expansion, the value of the plastic hardening modulus of the pile material and a large number of design features of the hydraulic expansion joint.

Key words: fixed offshore platform, structures of offshore fixed platforms, pile, numerical modeling, finite element method, plastic deformation

For citation: Gennady B. Kryzhevich, Rational design of hydro-flassable connections of piles with the bases of ice-resistant stationary platforms, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 3, P. 106—111. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.050

Введение

Объектами работы являются разжимные соединения (РС) свай с элементами опорных конструкций МСП (с гильзами) [1, 2]. Актуальность работы связана с обнаружением трещин при формировании таких соединений.

В настоящее время для соединения конструкций стационарных нефтегазодобывающих платформ и других морских сооружений с трубчатыми цилиндрическими сваями применяется технология гидравлического разжима, основанная на пластическом деформировании оголовков свай, при котором обеспечивается их плотный контакт с относительно жесткими гильзами, неподвижно закрепленными на платформах. При формировании такого соединения сваи и гильзы часто реализуется технология компании «Oil States International, Inc.», провайдером которой является фирма «Hydra-Lok», аккредитованная в 1993 году на соответствие стандарту BS5750 Часть 1 (ISO 9001, EN29001) в

части конструктивных решений, изготовления и эксплуатации устройств соединения и высаживания свай.

Взаимное расположение гильзы и сваи перед гидравлическим разжимом и формированием РС показано на рис. 1. При этом гильза закреплена на опорном основании МСП, а свая погружена в грунт за счет воздействия на нее осевых динамических нагрузок, способных снижать ее пластические свойства [5-7]. Толщины свай и гильз (в районе их кольцевых полостей) могут достигать больших величин порядка 90-100 мм и более, а диаметры свай – величин порядка 2 м. РС типа «Hydra-Lok Swaged Connection Systems» (рис. 1в) формируется за счет расширения внутренней трубы (сваи) в радиальном направлении до зацепления с гильзой с одновременным заполнением кольцевых полостей гильзы материалом сваи и образования значительной поверхности контакта гильзы и сваи путем непосредственного приложения внутреннего гидравлического давления (рис. 1а).

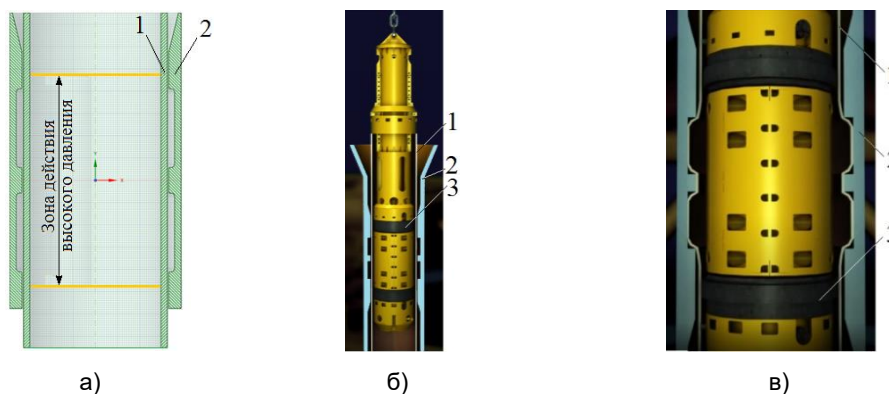


Рис. 1. Схемы расположения сваи 1, гильзы 2 и инструмента 3 перед гидравлическим разжимом (а и б) и непосредственно после него (в)

Для создания этого давления и выполнения РС используется предложенный фирмой специальный инструмент для гидроразжима, обеспечивающий одновременно центровку (соосность оголовка сваи и гильзы) и уплотнение системы на верхних и нижних границах зоны высокого давления жидкости (уплотнительные устройства показаны на рис. 1б и 1в в виде двух черных колец, закрепленных на инструменте).

В недавней публикации [2] изложены методика конечно-элементного моделирования упругопластического деформирования элементов РС и его формирования посредством гидроразжима. Методика основана на использовании программного комплекса Ansys Mechanical APDL [3] и учета реальных свойств сталей в пластической области [4]. Учёт пластического деформирования свай выполняется с применением линейной кинематической модели упрочнения. Моделирование производится при плоской осесимметричной постановке задачи с использованием конечных элементов второго порядка PLANE183. Между свайей и гильзой предусматривается задание контактных пар с трением. Размер задачи с учётом контактных элементов составляет порядка 9000 узлов, 3700 элементов и 18000 степеней свободы. Эта же методика используется для построения диаграмм

вытягивания свай из гильз, сопровождающегося их пластическим деформированием.

На основе анализа диаграмм вытягивания свай из опор установлены рациональные значения максимального давления разжима при двух различных величинах модулей упрочнения материала сваи, обеспечивающие требуемую работоспособность РС. В работе [8] показано, что для обеспечения высокого качества изготовления РС сваи с гильзой, а также его высокой надежности и работоспособности целесообразно использование специальных конструктивных элементов – деформируемых кольцевых упоров (рис. 2).

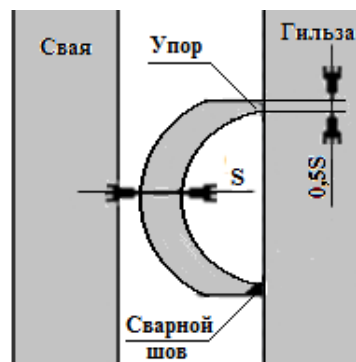


Рис. 2. Расположение упора относительно сваи и гильзы

Упоры соединены с гильзой и расположены между ней и сваей в зоне формирования максимальных прогибов сваи на начальных стадиях ее разжима и накопления максимальных пластических деформаций на последующих стадиях образования РС. Использование современных методов оптимизации конструкций [9-11], подтверждает, что такое расположение упоров является средством уменьшения цепных усилий в свае и максимальных остаточных деформаций в ее срединной поверхности.

1. Влияние конструктивных особенностей соединения на процесс повреждения материала при гидроразжиме

Целью настоящей работы является расширенный поиск рациональной конструкции РС, обеспечивающей бездефектное изготовление соединений и их высокую работоспособность при эксплуатации МСП. При таком поиске важно иметь

ясное представление о специфике повреждения материала сваи при гидроразжиме. В работе [2] выявлены две важные особенности пластического деформирования оголовка сваи при гидроразжиме:

- неравномерность пластического деформирования в осевом направлении с явным увеличением остаточных деформаций в зонах, соответствующих серединам кольцевых ниш гильзы, заполняемых при разжиме материалом сваи (рис. 3);
- превалирование в зоне повышенного деформирования растягивающего напряжения в окружном направлении над остальными компонентами напряжений (над осевым растягивающим напряжением и сжимающим напряжением в радиальном направлении).

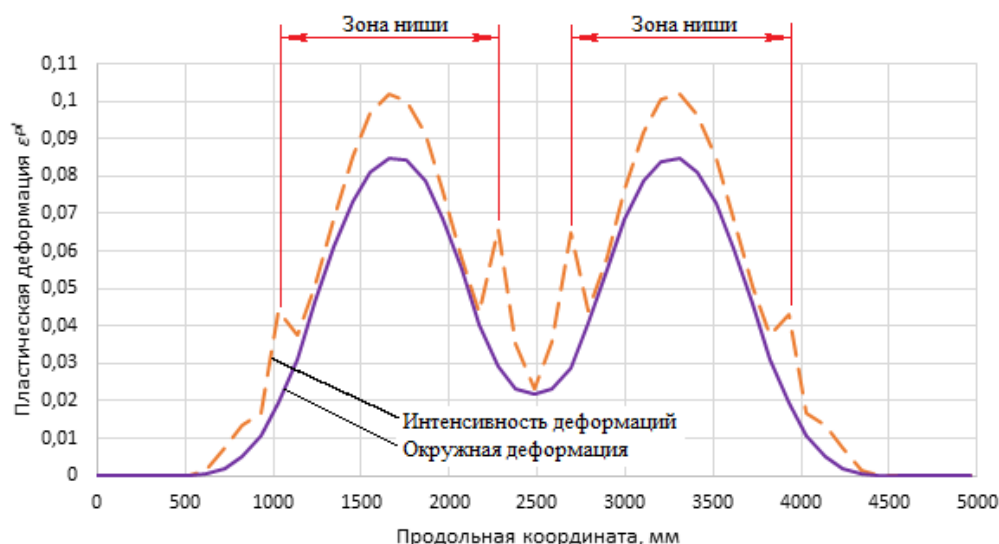


Рис. 3. Распределение интенсивности пластических деформаций и главной (окружной) пластической деформации по наружной поверхности сваи (вдоль деформированного положения образующей этой поверхности) для исходной конструкции РС

Увеличение окружного и осевого растягивающих напряжений приводит к увеличению жесткости напряженного состояния, снижению уровня предельно достижимого пластического деформирования, а также к повышению вероятности пластического разрушения. Увеличение сжимающего напряжения в радиальном направлении приводит к обратной тенденции (к снижению жесткости напряженного состояния и уменьшению вероятности пластического разрушения). Отмеченные особенности пластического деформирования и напряженного состояния в зоне повышенных остаточных деформаций могут быть положены в основу поиска рациональной конструкции РС, обеспечивающей бездефектное изготовление соединений.

Одновременное уменьшение максимальных значений интенсивности пластических деформаций, выравнивание распределения этих деформаций в осевом направлении интенсивности пластических деформаций (в пределах кольцевых полостей гильзы), снижение жесткости напряженного состояния и уменьшение вероятности пластического

разрушения происходит при установке на гильзе (в ее кольцевых полостях) пластически деформируемых упоров (рис. 4).

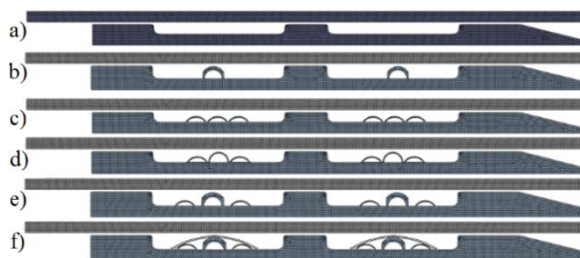


Рис. 4. Конечно-элементные модели системы «свая-гильза»: а) исходная конструкция, повернутая на угол 90°; б) жесткие упоры посередине кольцевых ниш гильзы, $h=0,4t$, $S=10$ мм; в) три одинаковых податливых упора; д) три податливых упора с разной высотой; е) три упора с разной высотой и жесткостью; ф) три упора с разной высотой и жесткостью, закрытые оболочкой

2. Основные расчетные зависимости для оценки возможности вязкого разрушения сваи при ее гидроразжиме

Перед появлением трещин в сваях (перед разрушением) наблюдается их пластическое деформирование. Поэтому в качестве критерия разрушения целесообразно рассматривать соотношение между достигнутым уровнем интенсивности пластических деформаций e_{pi} и предельным значением интенсивности $e_p^{пред.}$, при котором начинается процесс разрушения. Данный деформационный критерий [5], основанный на физической модели пластического разрыхления, сопровождающегося образованием пор и микротрещин, имеет вид

$$e_{pi} \geq e_p^{пред.}$$

Интенсивность пластических деформаций e_{pi} может быть определена как функция значений главных пластических деформаций e_{p1} , e_{p2} и e_{p3} в рассматриваемой точке (в элементе):

$$e_{pi} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_{p1} - e_{p2})^2 + (e_{p2} - e_{p3})^2 + (e_{p3} - e_{p1})^2}.$$

Известно, что важнейшим фактором, влияющим на пластическое деформирование материала, является интенсивность напряжений

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}{\sqrt{2}}, \quad (1)$$

где σ_i – главные напряжения.

Среднее напряжение $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ не вызывает пластической деформации, а только упругое изменение объема. Если $\sigma_i = 0$, то любой металл будет упругим и хрупким. Если максимальное главное напряжение $\sigma_1 < 0$, т.е. происходит сжатие, то микро- и макротрещины закрываются, увеличивая пластичность металла. Если металл подвергается трёхосному растяжению, как это обычно бывает у острых концентраторов напряжений в конструкциях, его пластические свойства резко снижаются. Учитывая эти обстоятельства, предельное значение интенсивности пластической деформации $e_p^{пред.}$ по предложению Н.А. Махутова определяется с учётом соотношения между интенсивностью напряжений σ_i и средним напряжением σ_0 следующим образом [5]:

$$e_p^{пред.} = D_e e_{p1}^{пред.}, \quad (2)$$

где $D_e = K_e \sigma_i / (3\sigma_0)$ – коэффициент снижения пластических свойств, характеризующий влияние интенсивности напряжений σ_i и среднего напряжения σ_0 на повреждаемость материала в процессе пластического деформирования; $e_{p1}^{пред.}$ – предельная пластическая деформация, найденная по результатам испытаний стандартных образцов цилиндрической формы при одноосном растяжении; K_e – коэффициент, учитывающий свойства материала (для малоуглеродистой стали $K_e = 1,0 - 1,2$).

Зависимость (2) подтверждена многочисленными экспериментами с образцами, содержащими концентраторы напряжений различной формы и изготовленными из разных марок сталей.

Наличие упоров приводит не только к снижению максимальных значений интенсивности пластических деформаций e_{pi} при гидроразжиме, но и к уменьшению их влияния на возможность разрушения, поскольку коэффициент D_e при этом также уменьшается. В самом деле, появление радиальных сжимающих напряжений в стенке сваи в зоне ее контакта с упорами приводит к падению уровня средних напряжений σ_0 в этой зоне (к уменьшению знаменателя в формуле для оценки коэффициента D_e) и росту числителя (интенсивности напряжений σ_i , определяемой по формуле (1)).

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 5. распределение интенсивности пластических деформаций после снятия давления гидроразжима 55 мПа: а) исходная конструкция, повернутая на угол 90°; б) одиночные упоры посередине кольцевых ниш; в) три упора в нише с разной высотой и жесткостью, закрытые оболочкой показаны распределения накопленных пластических деформаций в конструкциях сваи и гильзы после повышения давления гидроразжима до 55 МПа (до завершения полного гидроразжима) и последующей разгрузки. Интересно отметить, что максимальные значения интенсивности пластических деформаций находятся в процессе гидроразжима в средней части кольцевых ниш только при отсутствии достаточно жестких кольцевых упоров. Наличие таких упоров приводит к снижению максимальных значений интенсивности, выравниванию распределения деформаций в осевом направлении, причем при умеренных значениях давления разжима (на начальных стадиях процесса) максимум интенсивности пластических деформаций смещается относительно середины ниш и приходит в среднее положение только при завершении разжима.

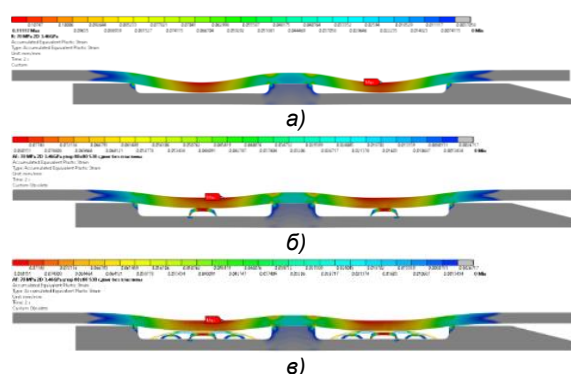


Рис. 5. Распределение интенсивности пластических деформаций после снятия давления гидроразжима 55 МПа: а) исходная конструкция, повернутая на угол 90°; б) одиночные упоры посередине кольцевых ниш; в) три упора в нише с разной высотой и жесткостью, закрытые оболочкой

Более высокие значения пластических деформаций наблюдаются не на наружной, а на внутренней поверхности сваи, испытывающей при гидроразжиге воздействие гидростатического давления. Это давление снижает жесткость напряженного состояния на внутренней поверхности сваи и создает на ней возможность более свободного развития пластических деформаций.

В таблице 1 приведены максимальные значения интенсивности пластических деформаций и коэффициенты запаса прочности сваи в условиях действия разжимных давлений для каждого варианта конструктивного оформления разжимного соединения, представленного на рис. 4. С учетом разброса пластических свойств материала сваи и их возможного падения в процессе забивки в грунт [7], требуемый коэффициент запаса прочности сваи должен составлять не менее 1,5. Из таблицы следует, что варианты конструктивного оформления а, с и д не обеспечивают требуемого запаса прочности рассмотренной сваи (наружный диаметр 2134 мм, толщина стенки 95 мм) при ее гидроразжиге и не могут быть рекомендованы для практического использования.

Тремя возможными конструктивно-технологическими решениями с точки зрения снижения уровня пластических деформаций и

достигаемого уровня прочности оказались варианты b, e и f. Варианты e и f мало отличаются друг от друга по уровням прочности и величинам остаточных деформаций. Сравнение всех рассмотренных вариантов по качеству диаграммы вытягивания сваи из гильзы (рис. 6), способ построения которой описан в работе [4], дает основание рекомендовать варианты e и f для широкого практического использования.

Таблица 1

Максимальная интенсивность пластических деформаций в свае за полный рабочий цикл гидроразжиге, ее снижение по сравнению с базовым вариантом и коэффициент запаса прочности сваи

Вариант конструктивного оформления	Максимальная интенсивность пластических деформаций	Снижение уровня интенсивности пластических деформаций	Коэффициент запаса прочности сваи при разжиге
a)	11,12%	0	1,02
b)	6,60%	41%	1,74
c)	9,17%	18%	1,25
d)	8,83%	21%	1,29
e)	6,32%	43%	1,81
f)	6,21%	44%	1,88

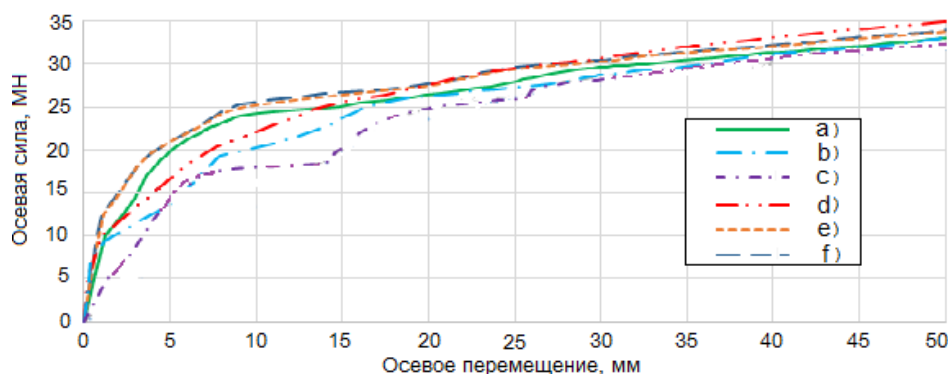


Рис. 6. Диаграмма вытягивания

Литература

- Hydra-Lok Swaged Connection Systems // YouTube [сайт]. URL: <https://youtu.be/FMRe5-Wozz4> (дата обращения: 24.04.2022).
- Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р., Численное моделирование формирования разжимных соединений свай с основаниями морских стационарных платформ и их работоспособности. Морские интеллектуальные технологии, 2022. № 3 часть 1, С. 340—345.
- Ansys Mechanical APDL Theory Reference. 2021. 952 с.
- Handbook of Materials Behavior Models, Volumes 1-3. Jean LeMaitre, 2001. 393 с.
- Махутов Н.А. Деформационные критерии и расчёт элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.
- Meshcheryakov Y.I. et al. Dynamic structures in shock-loaded copper. Physical Review B. 2008; 78(6).
- Барахтин Б.К., Мещеряков Ю.И., Савенков Г.Г. Динамические и фрактальные свойства стали СП-28 в условиях высокоскоростного нагружения. Журнал технической физики. 1998. Т. 68, №. 10. С. 43-49.
- Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Численное моделирование процессов упругопластического деформирования перекрытия ледового пояса морской ледостойкой платформы. Труды Крыловского государственного научного центра, 2015, выпуск 86 (370). С. 125-132.
- Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Оптимизация алюминиевой крышки люкового закрытия сухогрузного судна. – Морские интеллектуальные технологии. № 1 том 3. С. 58-65.
- Крыжевич Г.Б., Норьков Е.С., Филатов А.Р. Принципы и современные методы оптимального проектирования крупногабаритных судовых перекрытий. Труды Крыловского государственного научного центра, 2020, специальный выпуск 2. С. 83-88.

11. Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Конструктивное оформление узлов судовых конструкций с использованием программ топологической и параметрической оптимизации. Труды Крыловского государственного научного центра, специальный выпуск 1, 2020. С. 67-72.

References

1. Hydra-Lok Swaged Connection Systems // YouTube [сайт]. URL: <https://youtu.be/FMRe5-Wozz4> (дата обращения: 24.04.2022).
2. Kryzhevich G.B., Filatov A.R. Numerical simulation of design and operability of hydraulic locks connecting piles and substructures of fixed marine platforms. Marine Intellectual Technologies. 2022. No. 3, Vol. 1. P. 340–345 (in Russian).
3. Ansys Mechanical APDL Theory Reference. 2021. 952 p.
4. Handbook of Materials Behavior Models, Volumes 1-3. Jean LeMaitre, 2001. 393 p.
5. Makhutov N.A. Deformation criteria and structural elements strength calculation. Moscow: Mashinostroyeniye, 1981. 272 p.
6. Meshcheryakov Y.I. et al. Dynamic structures in shock-loaded copper. Physical Review B. 2008; 78(6).
7. Barakhtin B.K., Meshcheryakov Yu.I., Savenkov G.G. Dynamic and fractal properties of SP-28 steel under highspeed loading conditions. Technical Physics. 1998. Vol. 68, no. 10. P. 43-49.
8. Kryzhevich G.B., Filatov A.R. Numerical simulation of the processes of elastic-plastic deformation of the overlap of the ice belt of the sea ice-resistant platform. Transactions of the Krylov State Research Center, 2015. Vol. 86, no. 370. P. 125-132 (in Russian).
9. Kryzhevich G.B., Filatov A.R. Bulk carrier aluminum hatch cover optimization. Marine intellectual technologies, 2020/№ 1 part 3, P. 58-65 (in Russian).
10. Kryzhevich G.B., Norkov E.S., Filatov A.R. Principles and of optimal design methods for large ship grillages. Transactions of the Krylov State Research Center, 2020, special issue 2. P. 83-88 (in Russian).
11. Kryzhevich G.B., Filatov A.R. Design of ship structural assemblies using topological and parametric optimization. Transactions of the Krylov State Research Center, 2020, special issue 1. P. 67-72 (in Russian).

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

Геннадий Брониславович Крыжевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: a_gaikov@mail.ru

Gennady B. Kryzhevich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of ship design, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: g_kryzhevich@ksrc.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.06.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 24.07.2023.

Принята к публикации/accepted for 29.08.2023.

Научная статья

УДК 539.421

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.051>

Вариант построения двухкритериальной диаграммы разрушения цилиндрических оболочек с трещинами

А.А. Миронов¹ miran56@mail.ru, В.А. Кикеев¹ vkikeev@mail.ru¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Рассмотрены условия разрушения цилиндрических оболочек с продольными поверхностными трещинами, нагруженных внутренним давлением. Решение задачи основано на использовании двухкритериального подхода к оценке разрушения конструкций с трещинами, в рамках которого строится двухкритериальная диаграмма разрушения. В качестве критерия хрупкого разрушения конструкции с трещиной используется критерий Дж. Ирвина. В качестве параметра, определяющего нагрузку предельного состояния при вязком разрушении, предложено использовать мембранную составляющую критического раскрытия трещины. Раскрытие трещины определяется в рамках модели пластической зоны по Дагдейлу. В качестве уравнения, аппроксимирующего двухкритериальную диаграмму разрушения, описывающую области хрупкого, квазихрупкого и вязкого разрушений, принята зависимость по стандарту BS 7910. Показано хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных по разрушению труб и сосудов давления с поверхностными трещинами.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, поверхностная трещина, критерий разрушения, раскрытие трещины.

Для цитирования: Миронов А.А., Кикеев В.А. Вариант построения двухкритериальной диаграммы разрушения цилиндрических оболочек с трещинами, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 3, С. 112—115. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.051

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.051>

Variant of constructing a two-criterion diagram of the failure of cylindrical shells with cracks

Anatoliy A. Mironov¹ miran56@mail.ru, Vasiliy A. Kikeev² vkikeev@mail.ru¹Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. The conditions of the failure of cylindrical shells with longitudinal surface cracks loaded with internal pressure are considered. The solution of the problem is based on the usage of a two-criteria approach to assessing the failure of structures with cracks. A two-criteria fracture diagram was constructed within the framework of the approach. J. Irwin's criterion is used as a criterion for brittle fracture of a structure with a crack. It is proposed to use the membrane component of the critical crack opening as a parameter that determines the limit state load in ductile fracture. Fracture opening is determined within the Dugdale's model of plastic zone. The dependence according to the BS 7910 standard was adopted as an approximating equation the two-criterion fracture diagram, which describes the areas of brittle, quasi-brittle and viscous destruction. There is a good agreement between the calculated and experimental data on the fracture of pipes and pressure vessels with surface cracks.

Key words: cylindrical shell, surface crack, fracture criterion, crack opening.

For citation: Anatoliy A. Mironov, Vasiliy A. Kikeev, Variant of constructing a two-criterion diagram of the failure of cylindrical shells with cracks, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 3, P. 112—115. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.051

Введение

Проблема безопасной эксплуатации объектов инфраструктуры освоения Арктики включает в себя задачу предупреждения разрушений, причинами которых являются дефекты типа трещин. Причины возникновения таких дефектов связаны с конструктивно-технологическими и эксплуатационными факторами, к которым в первую очередь относятся процессы сварки и усталостный характер нагружения конструкций. Рост дефектов до критических размеров приводит к катастрофическим разрушениям. Оценка опасности таких разрушений выполняется на основе критериев разрушения элементов конструкций с трещинами. Выбор критерия определяется в первую очередь

характером разрушения, который может быть хрупким, вязким и квазихрупким. Характер разрушения зависит от свойств материала, температуры эксплуатации, относительных размеров трещины и элемента конструкции. Практический интерес представляет возможность описания разрушения во всем диапазоне изменения характера разрушения. Такая возможность реализуется в рамках двухкритериального подхода к оценке разрушения, на основе которого строится двухкритериальная диаграмма разрушения элемента конструкции с трещиной.

Начало развития двухкритериального подхода связано с работами Е.М. Морозова, в которых было введено понятие предела трещиностойкости, и работами Ньюманна и Таунли, в которых был

предложен двухпараметрический критерий разрушения.

В рамках данного подхода используются критерий хрупкого разрушения $K = K_c$ и условие предельного пластического состояния $P = P_{LL}$. Всевозможные реализации разрушения элемента конструкции с трещиной аппроксимируются кривой на плоскости с координатами $K_r = K / K_c$ и $S_r = P / P_{LL}$ между двумя крайними случаями разрушений - хрупкого и вязкого.

В настоящее время данный подход закреплен в ряде стандартов [1], [2], используется при оценке трещиностойкости объектом морской техники [3] и успешно развивается [4].

Модель предельного пластического состояния

Для элемента конструкции с поверхностной трещиной предельное состояние, связанное с невозможностью дальнейшего повышения нагрузки, будет соответствовать достижению напряженного состояния на пределе прочности по всему рабочему сечению с трещиной. Данная трактовка предельного состояния не удовлетворяет требованиям к конструкциям, для которых недопустимо образование течи. Использование в качестве предельного состояния условие достижения напряжением значения предела прочности в перемычке, отделяющей поверхностную конфигурацию трещины от сквозной, приводит к излишне консервативному значению предельной нагрузки. Такой результат связан с ограниченностью раскрытия трещины, в пределах которого материал способен деформироваться без разрушения после достижения напряжением значения предела прочности. Для учета данного эффекта предлагается определять нагрузку предельного пластического состояния из условия разрушения перемычки и переходу поверхностной трещины в состояние сквозной. В качестве такого условия принимается достижение критического значения мембранной составляющей раскрытия трещины: $\delta = \delta_c$.

Определение раскрытия трещины выполняется в рамках расчетной схемы модели пластической зоны по Дагдейлу. Рассматривается сквозная трещина протяженностью $2(c + x_p)$, на берегах которой в зонах пластических деформаций действуют напряжения $\sigma_F = \sigma_e$ и $\sigma_R = (\sigma_{0,2} + \sigma_e) / 2$ (рис. 1).

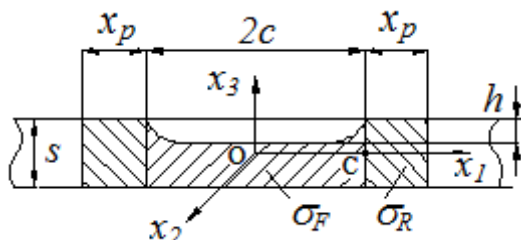


Рис. 1. Расчетная схема модели Дагдейла для поверхностной трещины (зоны пластических деформаций заштрихованы)

Выражение для мембранной составляющей раскрытия δ в центре трещины в случае пластины в

условиях растяжения напряжениями σ на основе решений, полученных в работе [5], принимает вид:

$$\delta(o) = \frac{4c\sigma_F}{\pi E} \left(\frac{\sigma_R}{\sigma_F} - 1 + \frac{h}{s} \right) \ln \frac{1 + \sin \Phi}{1 - \sin \Phi}$$

$$\text{где } \Phi = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sigma - (1 - h/s)\sigma_F}{\sigma_R - (1 - h/s)\sigma_F}.$$

Для случая продольной трещины в цилиндрической оболочке с радиусом R длина трещины определяется с поправкой на кривизну $M = (1 + 1,05\rho)^{1/2}$, где $\rho = c^2 / R s$ [6].

Из (1) следует выражение для разрушающего напряжения:

$$\sigma_c = \sigma_F \left\{ \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{\exp \phi - 1}{\exp \phi + 1} \left[\frac{\sigma_R}{\sigma_F} - \left(1 - \frac{h}{s} \right) \right] + \left(1 - \frac{h}{s} \right) \right\}$$

$$\text{где } \phi = \pi \delta_c E / 4 c M^2 \sigma_F (\sigma_R / \sigma_F - 1 + h / s)$$

Выполнение критерия разрушения в точке О (см. рис.1) приводит к разрушению перемычки и образованию сквозной трещина. Условием дальнейшего развития сквозной трещины является выполнение критерия для точки С, величина раскрытия в которой определяется выражением:

$$\delta(c) = \frac{8\sigma_R c M^2}{\pi E} \ln \left[\sec \left(\frac{\pi \sigma}{2\sigma_R} \right) \right]$$

Ограничение использования модели Дагдейла связано с переходом оболочки в состояние общей текучести. Такие условия разрушения могут наблюдаться для относительно неглубоких трещин. Разрушающее напряжение в этом случае изменяется в диапазоне от предела текучести до временного сопротивления. Разрушающее давление может быть представлено в виде аппроксимации между значением, соответствующем разрушению оболочки с трещиной при общей текучести, и значением для бездефектной оболочки:

$$p_c = p_{cT} \frac{h}{h_T} + p_0 \left(1 - \frac{h}{h_T} \right)$$

где p_c - разрушающее давление при глубине трещины $h < h_T$; p_{cT} - разрушающее давление при глубине трещины h_T , соответствующей разрушению при общей текучести; p_0 - разрушающее давление для оболочки без трещины.

С учетом изложенной модели предельного состояния для продольной поверхностной трещины в цилиндрической оболочке относительный параметр вязкого разрушения в рамках двухкритериального подхода принимает вид: $S_r = \sigma / \sigma_c$, $S_{r \max} = 1$, где σ_c определяется по зависимости (2), а при общей текучести с учетом (3).

Двухкритериальная диаграмма разрушения

В качестве уравнения, аппроксимирующего двухкритериальную диаграмму разрушения, используем зависимость по стандарту BS 7910 [1]:

$$K_r = \left(1 - 0,14 S_r^2 \right) \left[0,3 + 0,7 \exp \left(-0,65 S_r^6 \right) \right], \quad S_r \leq S_{r \max}$$

В рамках стандарта [1] в отличие от предложенного подхода к определению параметра S_r используется его следующее определение:

$$S_r = \sigma_{ref} / \sigma_{0,2}, S_{r max} = (\sigma_b + \sigma_{0,2}) / 2\sigma_{0,2},$$

где σ_{ref} - среднее расчетное напряжение в перемычке.

Для сравнительного анализа предложенного подхода и рекомендаций стандарта [1] к определению разрушающего напряжения в оболочке с поверхностной трещиной использованы экспериментальные данные по разрушению труб [6, 7] и сосудов давления [8].

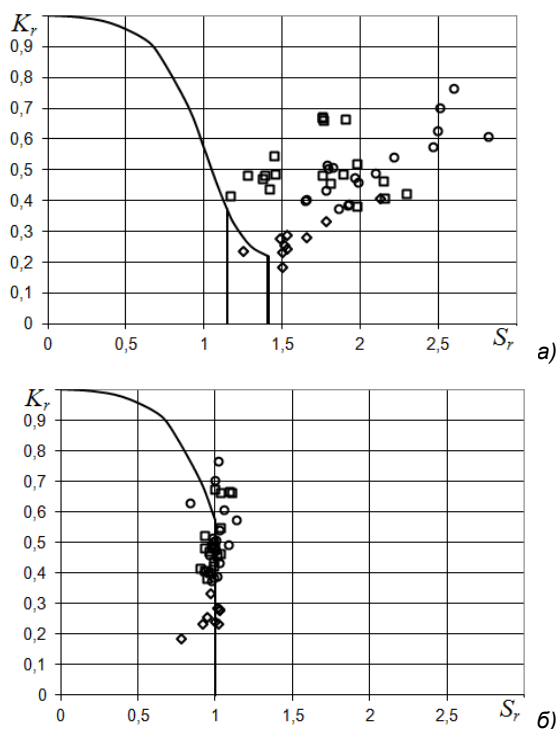


Рис. 2. Двухкритериальная диаграмма разрушения: а) – по методике [1], б) – предложенный подход (экспериментальные данные: $\square$ – [6], $\diamond$ – [7], $\circ$ – [8])

Результаты сравнения экспериментальных данных с расчетными диаграммами разрушения, построенными по двум рассматриваемым подходам, представлены на рис. 2. Вертикальные линии на рис. 2 а) выделяют диапазон значений $S_{r max}$ для рассмотренных сталей.

При использовании данных работы [7] критическое значение раскрытия δ_c было определено по результатам испытаний труб со сквозными трещинами. В остальных случаях принималось среднее значение по результатам разрушений всей серии труб или сосудов из одной марки стали. Обработка имеющихся экспериментальных данных показала, что для относительно глубоких трещин с $h/s > 0,7$ в расчетной модели следует принять $\sigma_F = 1,15\sigma_s$.

Заключение

Из представленных результатов следует, что предложенный подход к двухкритериальной оценке разрушения цилиндрических оболочек с поверхностными трещинами дает хорошее совпадение с имеющимися экспериментальными данными и может быть использован для обоснования коэффициентов запаса прочности. В рамках данного подхода подтверждается прогноз развития ситуации «течь перед разрушением». Расчетные зависимости позволяют определять разрушающее давление в широком диапазоне относительной глубины дефектов, включая случаи общей текучести оболочки. Использование в рамках данного подхода деформационных характеристик сталей позволяют учесть снижение разрушающего давления, вызванного процессами старения, воздействием коррозионных сред и низких температур.

Литература

1. BS 7910:1999: Guide on methods for assessing the acceptability of flows in metallic structures. London: British Standards, 2000, 262 p.
2. М-02-91. Методика определения допускаемых дефектов в металле оборудования и трубопроводов во время эксплуатации АЭС. М., 1991, 20 с.
3. Губайдулин Р.Г., Тиньгаев А.К., Губайдулин М.Р. Определение остаточного ресурса опорного блока морской стационарной платформы. Академический вестник УралНИИпроект РААСН, 2012, № 1, с. 80-85.
4. Matvienko YG. The two-parameter fracture criterion based on the J-A concept. Fatigue Fract Eng Mater Struct. 2023;1-13. doi:10.1111/ffe.14075
5. Civelek M. B. Elastic-plastic problem for a part-through crack under extension and bending. International Journal of Fracture, 1982, Vol. 20, № 1, p. 33–46.
6. Орыняк И.В., Ляшенко С. В., Тороп В. М., Горицкий В. Н. Применение модели вязкого разрушения труб с осевыми дефектами для анализа результатов натурных экспериментов. Проблемы прочности, 1996, № 6, с. 5-15.
7. Даффи А. Р., Мак Клур Дж. М., Айбер Р. Дж., Мэкси У. А. Практические примеры расчёта на сопротивление хрупкому разрушению трубопроводов под давлением. Разрушение. В 7 т. Т. 5. Расчёт конструкций на хрупкую прочность. М., Машиностроение, 1977, с. 146 – 209.
8. Зайнуллин Р.С. Несущая способность сварных сосудов с острыми поверхностными дефектами. Сварочное производство, 1981, № 3, с. 5–7.

References

1. BS 7910:1999: Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. London: British Standards, 2000, 262 p.
2. M-02-91. Metodika opredeleniya dopuskaemykh defektov v metalle oborudovaniya i truboprovodov vo vremya ekspluatatsii AES [Methodology of determining permissible defects in the metal of equipment and pipelines during NPP operation]. M., 1991, 20 s.
3. Gubaydulin R.G., Tin'gaev A.K., Gubaydulin M.R. Opredelenie ostatochnogo resursa opornogo bloka morskoy stantsionarnoy platform [Determination of the residual resource of the support unit of the marine stationary platform]. Akademicheskii vestnik UralNIIProekt RAASN [Academic Bulletin UralNIIProekt RAASN], 2012, № 1, s. 80-85.
4. Matvienko YG. The two-parameter fracture criterion based on the J-A concept. Fatigue Fract Eng Mater Struct. 2023;1-13. doi:10.1111/ffe.14075
5. Civelek M. B. Elastic-plastic problem for a part-through crack under extension and bending. International Journal of Fracture, 1982, Vol. 20, № 1, p. 33–46.
6. Orynyak I.V., Lyashenko S. V., Torop V. M., Goritskiy V. N. Primenenie modeli вязкого разрушения труб осевыми дефектами для анализа результатов натурных экспериментов [Application of the viscous fracture model of pipes with axial defects for the analysis of the results of full-scale experiments]. Problemy prochnosti [Problems of strength], 1996, № 6, s. 5-15.
7. Daffi A. R., Mak Klur Dzh. M., Ayber R. Dzh., Meksi U. A. Prakticheskie primery rascheta na soprotivlenie khrupkomu razrusheniyu truboprovodov pod davleniem [Practical examples of calculation of resistance to brittle fracture of pipelines under pressure]. Razrushenie. V 7 t. T. 5. Raschet konstruksiy na khrupkuyu prochnost' [Destruction. In 7 volumes. Vol. 5. Calculation of structures of brittle strength]. M., Mashinostroenie, 1977, s. 146 – 209.
8. Zaynullin R.S. Nesushchaya sposobnost' svarnykh sosudov s ostrymi poverkhnostnyimi defektami [Bearing strength of welded vessels with sharp surface defects]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding production], 1981, № 3, s. 5–7.

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

Анатолий Алексеевич Миронов, 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

Василий Андреевич Кикеев, 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

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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.06.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.08.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 26.08.2023.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Научная статья

УДК 624.042.43

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.052>

Механическая модель взаимодействия дрейфующего льда с протяженным сооружением

А.Н. Сахаров¹ alexandr.sakharov@math.msu.ru

¹МГУ им.М.В.Ломоносова, Москва

Аннотация. Рассматривается взаимодействие дрейфующего поля ровного льда с наклонной гранью широкой платформы или протяженного защитного мола. Модели плавающей упругой балки-полоски или пластинки на упругом основании оказываются эффективными для расчета глобальной ледовой вертикальной P и горизонтальной N нагрузок. Учет горизонтальной нагрузки в большинстве работ производится в критерии прочности, определяемой по достижению условия прочности на изгиб (или растяжение) в крайнем волокне в опасном сечении. В статье выполнен учет действия сжимающих напряжений и в критерии, и в уравнениях равновесия. Получено аналитическое решение задачи равновесия плавающей балки в условиях сжатия и изгиба, найдены координаты сечения балки, где действует максимальный изгибающий момент. На плоскости P - N построены кривые, задающие предельные нагрузки для балки. Это позволяет эффективно находить максимальные нагрузки на сооружение в зависимости от сценария взаимодействия (начальный контакт, модель Кроасдейла). Рассмотрена задача о плавающей пластинке с контактным краем, состоящим из дуг окружностей. Решение методом конечного элемента не выявило принципиальных отличий от исследованной модели плавающей балки-полоски. Выполненный расчет показывает, что размер блоков на порядок превышает толщину льда и мало соответствует наблюдаемому в натурных условиях.

Для более реалистичного описания рассматривается силовое взаимодействие поля на сооружение посредством образуемого нагромождения. Установлено, что такая модель позволяет объяснить наблюдаемый размер блоков при разрушении дрейфующего ровного поля.

Ключевые слова: ледовая нагрузка, балка на упругом основании, ледовые нагромождения, разрушение изгибом.

Благодарности: автор выражает благодарность Карулину Е.Б. и Карулиной М.М. за полезные обсуждения проблемы ледовых нагромождений.

Для цитирования: Сахаров А.Н. Механическая модель взаимодействия дрейфующего льда с протяженным сооружением, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 3, С. 116—121. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.052

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.052>

Mechanical model of drifted ice interaction of wide offshore structure

Alexandr N. Sakharov¹ alexandr.sakharov@math.msu.ru

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow

Abstract. The interaction of a drifting ice sheet and wide sloping offshore structures is under consideration. The model of elastic beam and elastic plate equilibrium on hydraulic foundation turn out to be effective for calculation the values both vertical P and horizontal N forces. In many researches the compression force is taken into account in strength criterion of ice bending failure. The compression force is under consideration both in the failure criterion and in the equation of equilibrium. An analytical solution of equilibrium of a floating beam under compression and bending conditions is obtained, the coordinates of the beam section where the maximum bending moment acts are found. The limit curves on the a plane P - N allow to determinate loads value for various scenarios of ice-structure interaction efficiently (initial contact, the Croasdale's scheme).

The problem of equilibrium of floating ice sheet constrained on the contact surface by sequences of arcs is simulated by FEM model. The dimension of break off ice blocks in FEM analyses is in the same order as on the analytical beam solution. The performed calculation shows that blocks size is an order of magnitude greater than the ice thickness and doesn't correspond to that observed in natural conditions.

The pile-up formation is used in the modeling of ice-structure interaction. It allows to describe this process more realistically.

Key words: ice load, beam on an elastic foundation, ice pile-up formation, bending failure.

Acknowledgment: the author is grateful to Dr. Karulin E.B. and Dr. Karulina M.M. for useful discussion concerning the pile-up problem.

For citation: Alexandr N. Sakharov, Mechanical model of drifted ice interaction of wide offshore structure, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 3, P. 116—121. DOI:10.37220/MIT.2023.61.3.052

Введение

Расчет ледовых нагрузок на протяженные инженерные сооружения на шельфе замерзающих морей (ледостойкие платформы, заградительные молы) необходим при анализе предпроектных решений и на стадии проектных работ. Особенностью взаимодействия ледового поля с широкой конструкцией состоит в образовании нагромождений льда по фронту. В результате расчет нужно производить не только на определение нагрузок при начальном контакте ровного поля льда с сооружением, но и в процессе образования навала перед ним.

Для определения нагрузки при начальном контакте ровного поля основной является модель упругой балки-полоски или упругой пластины на гидравлическом основании. Поскольку лед прогибается изгибом, чем смятием, поверхность сооружения делают наклонной (по крайней мере вблизи ватерлинии) – конической или призматической. Разработке такого подхода, основанного на разрушении льда изгибом при контакте с сооружением посвящено много работ. Некоторые расчетные модели воздействия ровного льда на конические и широкие сооружения с наклонной гранью (Кроасдейл [1], Мааттанен [2], Ралстон [3], Невел [4], Содхи [5], Вершинин [6]) стали хорошей основой инженерных методик и строительных норм [7,8].

В работе рассматривается один из сценариев взаимодействия – ломка изгибом ровного поля при контакте с навалом и накопление образовавшихся ледовых блоков перед сооружением. Предполагается, что поле движется с постоянной скоростью V , фронт разрушения со скоростью s . Усилие на сооружение определяется несущей способностью края поля сопротивляться действию горизонтальных и вертикальных сил. Разрушение носит циклический характер: вертикальная нагрузка, действующая со стороны навала, может быть направлена как вниз – вес надводных обломков превышает архимедову силу со стороны подводной части нагромождения, так и вверх. Наряду с вертикальной нагрузкой на край ледового поля при контакте действует и сжимающая сила. Эта сила действует со стороны навала, уравновешивая силу, действующую на поле со стороны ветра или течения. Вычисляя мощность диссипации (смятие льда, трение ледяных блоков) и скорость накопления потенциальной энергии за счет совершаемой работы по заталкиванию обломков с ростом навала, можно определить усилие сжатия, если задать геометрию формы навала и свойства блоков льда в навале [8,9].

Основной моделью разрушения льда при возникновении изгибных трещин в ледовом поле является модель балки-полоски на упругом основании [10,11]. Сжатие вносит свой вклад, как в условие равновесия, так и в критерий разрушения. В работе принято в качестве критерия достижения в крайнем волокне предела прочности при растяжении $\sigma = \sigma_f$. Вначале решим задачу разрушения полубесконечной полоски в условиях сжатия и изгиба.

1. Одномерная модель.

Для учета сжимающей нагрузки в равновесии упругой балки-полоски на упругом основании

запишем уравнение продольно-поперечного изгиба [12]:

$$Dw^{IV} + (N(x)w')' + kw = q(x) \quad (1)$$

где $D = \frac{1}{12} E h^3$ – цилиндрическая жесткость балки-полоски, $E' = (1 - \nu^2)^{-1} E$, $k = \rho_w g$ – коэффициент жесткости основания. Запишем (1) в безразмерном виде, полагая сжимающее усилие постоянным $N(x) = N$; $x \leq 0$,

$$\frac{d^4 u}{d\xi^4} + 2 \sin \theta \frac{d^2 u}{d\xi^2} + u = 0 \quad (2)$$

$$\text{где } u = \frac{w}{l_c}; \quad \xi = \frac{x}{l_c}; \quad l_c = \left(\frac{D}{k} \right)^{1/4}, \quad \sin \theta = \frac{N}{N_*},$$

$N_* = 2\sqrt{kD}$ – критическая нагрузка потери устойчивости. Корни характеристического уравнения $\lambda_{1,2,3,4} = \pm \cos \chi \pm i \sin \chi$, $\chi = \pi/4 + \theta/2$. В случае совместного действия горизонтальной N и вертикальной P сил на край полубесконечной балки из условий затухания решения на бесконечности и условия равенства нулю изгибающего момента на краю балки можем найти максимальный изгибающий момент, который достигается в сечении $x_* = l_c \xi_*$; $\xi_* = \chi (\sin \chi)^{-1}$.

$$M = Dw''(x_*) = \exp(-\chi \operatorname{ctg} \chi) Pl_c, \quad (3)$$

В качестве критерия разрушения льда примем условие: напряжение в крайней фибре балки равно пределу прочности льда на изгиб:

$$\frac{6M}{h^2} - \frac{N}{h} = \sigma_f \quad (4)$$

Подставляя значение момента из (3) в (4) найдем условие разрушения при действии на краю балки силы P и N .

$$P = \frac{\exp(\chi \operatorname{ctg} \chi)}{6} \frac{h}{l_c} (\sigma_f h + N) \quad (5)$$

На рис.1 дан график для нагрузок в безразмерных значениях в соответствии с формулой (5). В качестве механических характеристик льда в расчете взято: $E = 3 \text{ GPa}$; $\nu = 0.3$, изгибная прочность льда $\sigma_f = 300 \text{ KPa}$.

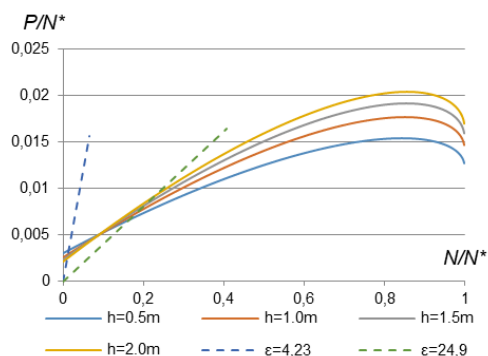


Рис.1 График зависимости предельных значений нагрузок (сплошные линии) для льда толщиной 0.5-2.0 м.

Из анализа формулы (5) следует:

– учет сжатия в критерии разрушения многократно увеличивает величину отламываемой

силы P^* в сравнении с плавающей балкой без продольного сжатия, пренебрегать им нельзя.

– при $N \leq 0,5N^*$ допустимо упростить расчет, учитывая сжимающую силу только в критерии разрушения. Учет сжимающей силы в уравнении равновесия существенен при больших усилиях сжатия, когда начинает сказываться геометрическая нелинейность. При $N \leq 0,85N^*$ предельное значение P начинает убывать, это означает, что ресурс увеличения прочности балки-полоски на изгиб за счет сжатия исчерпан.

– размер отлома блока от балки-полоски задает координата сечения с максимальным изгибающим моментом, откуда следует, что размер блока изменяется от $\frac{1}{4}\pi l_c$ (без действия сжимающей силы) до $\frac{1}{2}\pi l_c$ (при $N \rightarrow N^*$).

Кривые на рис.1 очерчивают область максимальных нагрузок, действующих на сооружение со стороны балки. Ими удобно пользоваться в случае анализа взаимодействия ровного поля с наклонной гранью на начальном этапе (рис.2а) или когда применяется модель Кроасдейла (рис.2б), т.е., когда балка уравнивается только гидравлическим основанием.

В этом случае можно задавать соотношение между силами, действующими на край балки, в виде $N = \varepsilon P$. Например, для случая на рис.2а $\varepsilon = \tan \tilde{\alpha}$ определяется эквивалентным углом $\tilde{\alpha} = \alpha + \tan^{-1} \mu_{is}$ где α - угол наклона грани в районе ватерлинии, μ_{is} - коэффициент трения льда по грани [13]. На рис.1 построены пунктирные линии зависимости $N = \varepsilon P$ при $\varepsilon = 4,23$ ($\alpha = 60^\circ$; $\mu_{is} = 0,3$) и при $\varepsilon = 24,9$ ($\alpha = 71^\circ$; $\mu_{is} = 0,3$). Последнее почти не встечается при проектировании – эквивалентный угол близок к прямому, однако в рамках взаимодействия поля с сооружением по модели Кроасдейла (рис.2б) такая ситуация возможна. После первого и нескольких последующих отломов блоков льда от поля нагрузка P в отличие от случая рис.2а меняет знак, значение её будет определяться весом обломков и силой трения по поверхности.

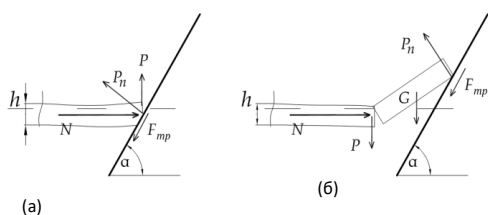


Рис.2 (а- начальное взаимодействие; б-модель Кроасдейла)

Параметр ε может изменяться в процессе разрушения поля. В результате множеству сценариев взаимодействия будут соответствовать прямые $N = \varepsilon P$, исходящие из начала координат (рис.1), а предельные нагрузки определяются как точки их пересечения с графиками предельных значений (5). *Замечание:* надо помнить, что кривые на рис.1 построены в безразмерных координатах, N^* для льда толщиной 2,0м отличается от N^* для льда толщиной

в 1 м – в 8 раз. Поэтому принимая прочность льда на сжатие [14] $\sigma_c = 3MPa$, нетрудно установить, что для льда тоньше 1,0м возможна потеря устойчивости равновесия балки на гидравлическом основании, для более толстого льда потеря устойчивости наблюдаться не будет – лед разрушится смятием.

2. Двумерная модель.

Рассмотрим сценарий разрушения края поля как последовательность локальных разрушений, происходящих вдоль края поля. Моделируем край поля периодической цепочкой дуг окружности (рис.3). Аналитическое решение задачи для плавающей упругой пластинки для такой области затруднено, поэтому будем пользоваться конечноэлементным расчетом SCADv.7.11.



Рис.3. Представление контактного края поля цепочкой дуг.

Пластинку считаем упругой и изотропной. Дуга цепочки задается безразмерным радиусом $\hat{R} = R/l_c$ и углом ψ . Полагая, что разрушение пластинки происходит при достижении первым главным напряжением значения предела прочности на растяжение $\sigma = \sigma_f$ (1-й критерий прочности), будем находить положение опасных сечений. Как и в случае балки-полоски для простоты расчета полагаем, что к краю пластинки приложены сосредоточенные вертикальная P и нормальная N силы в точках смыкания дуг.

Выполненный конечноэлементный расчет показывает (рис.4), что вблизи действия вертикальной сосредоточенной силы P значение изгибающего момента M_θ достаточно для появления во льду радиальных трещин [15], причем силы сжатия N несущественно влияют на их рост.

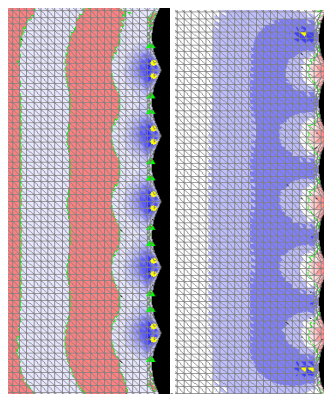


Рис.4. -изополя главных напряжений (значения $R/l_0=0,9; 0,3; \psi=\pi/3$)

После появления радиальных трещин необходимо решать задачу о плавающем упругом клине, исследование этой задачи выполнено Невелом [4] и Содхи [5]. Положение линии отлома (рис.3) и в случае плавающей пластинки не соответствует натурным наблюдениям (см.фото). Разрушение поля на блоки порядка 1-3 толщин льда не может быть объяснено из модели плавающей упругой балки-полоски или плавающей упругой пластины.



Фото. Появление окружных трещин при контакте ровного поля с образующимся навалом у наклонной грани платформы.

3. Стадия разрушения поля в образующемся навале.

Для объяснения малых размеров блоков льда, наблюдаемых в навале перед сооружением, следует предположить, что разрушение происходит в результате достижения предельного значения изгибающего момента M_s в той части поля, в которой балка подпирается снизу подводной частью навала («киль») (рис.5). Будем условно называть этот участок «сухим». Тогда плавающая часть балки может рассматриваться как система, уравнивающая некомпенсированные величины изгибающего момента M и перерезывающей силы Q от действия распределенных нагрузок: q_+ - веса надводной части навала («парус») и q_- - архимедовой силы подводной части. С учетом затухания на бесконечности такое решение для плавающей балки всегда существует и единственно.

Будем моделировать распределение нагрузок в зоне контакта поля с навалом, следуя работе [9, 16]. Будем полагать, что профиль распределенных нагрузок q_+ и q_- - треугольный (рис.6), что соответствует натурным исследованиям профилей навалов и торосов. Будем также полагать, угол наклона профиля постоянный для каждой части навала и не меняется в процессе взаимодействия.

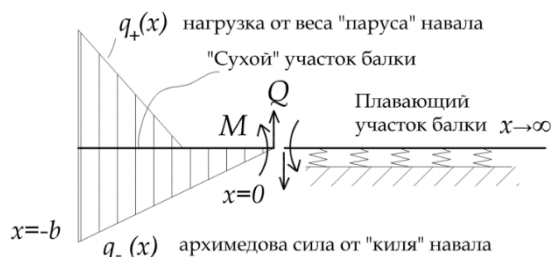


Рис. 6. Взаимодействие края балки с навалом.

Взаимодействие края балки с навалом представим как последовательный процесс приложения нагрузок q_+ и q_- к «сухому» участку

балки при движении её края $x=-b$ относительно эпор, причем движение будем отсчитывать слева направо согласно рис.6.

Если вес паруса G_+ , опирающегося на балку становится больше, чем архимедова сила G_- подпирающей части килля, то на «сухом» участке балки появится локальный максимум изгибающего момента в точке смены знака перерезывающей силой, т.к. $dM/dx = Q(x)$. При дальнейшем движении

балки изгибающий момент в точке смены знака будет возрастать, пока не достигнет предельного. Такой сценарий соответствует заталкиванию блока вниз (рис.7а). Этот процесс является повторяющимся, за счет увеличения количества блоков в киле увеличивается длина «сухого» участка, где действует только архимедова сила от килля, поэтому растет значение изгибающего момента $M(0)$ обратного знака в точке перехода от «сухого» участка к плавающему. Этот сценарий соответствует заталкиванию блока вверх (рис.7б), за счет чего увеличивается вес паруса.

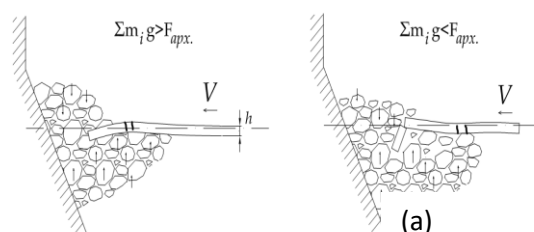


Рис.7 Стадия сброса (а) и стадия накопления блоков льда в надводной части навала (б)

Таким образом, оба процесса сменяют друг друга и являются периодическими. На рис.8 построены графики для распределенных нагрузок, перерезывающей силы и изгибающего момента на «сухом» участке балки, полученные интегрированием системы уравнений.

$$\begin{cases} Dw_1^{IV} = q(x); & x < (-c, 0) \\ Dw_2^{IV} + kw_2 = 0; & x \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

где $q(x) = q_+(x) + q_-(x)$ - распределенная нагрузка от действия архимедовой силы $q_-(x) = (\rho_w - \rho_i)g \cdot \text{tg} \varphi_- \cdot x$; $x < (-c, 0)$ и веса надводной части навала $q_+(x) = -\rho_i g \cdot \text{tg} \varphi_+ (d+x)$; $x < (-c, -d)$, φ_+, φ_- углы наклона профилей паруса и килля, соответственно; для «сухой» части балки приняты в качестве краевых условия $Q(-c) = M(-c) = 0$

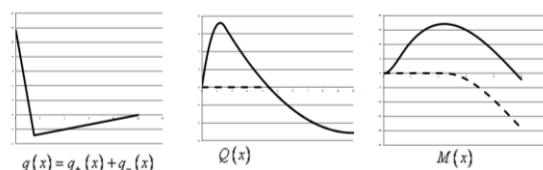


Рис.8

Из статической определенности задачи для сопряжения «сухой» и плавающей частей находим

$Q(0) = \int_{-c}^0 q(x) dx$; $M(0) = \int_{-c}^0 q(x) x dx$, достаточные для определения констант (второе уравнение системы) с учетом затухания на бесконечности для плавающей части балки (рис.9).

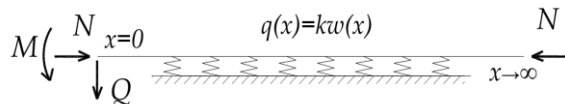


Рис.9. Равновесие плавающего участка балки

Полагаем, что изгибающий момент M , приложенный к концу балки есть следствие эксцентриситета нагрузки $M = Ne$, $|e| < h/2$ $q(x) = q_+(x) + q_-(x)$

Для оценки эксцентриситета воспользуемся обращенной схемой модели Содхи [17] для балки с фиксированными концами (рис. 10).

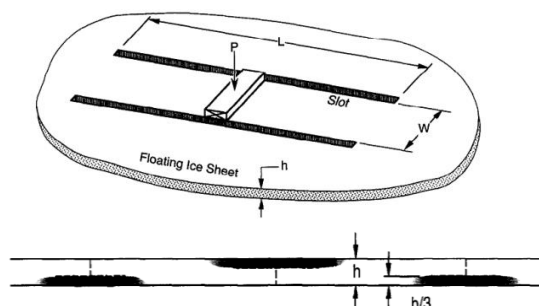


Рис.10 (а)- схема нагружения балки; (б)-распределение сжатых зон в балке после образования центральной и корневой трещин.

В опыте Содхи по изгибу балки с фиксированными концами: вертикальная сила P – нагрузка, продольная сжимающая сила N – реакция.

Реактивная сила N образована сжимающими напряжениями в зоне микрорастрескивания, по оценке Содхи размер области сжатия $h/3$. Принимая в области растрескивания распределение напряжений равномерным и равным пределу прочности льда на смятие σ_c , найдем $N = \sigma_c h/3$

Эксцентриситет приложения силы сжатия N относительно оси балки также равен $h/3$. Тогда найдем значение изгибающего момента, вызываемого эксцентриситетом $M = Ne$, $|e| < h/2$

Найденного значения изгибающего момент достаточно для того, чтобы поля разрушалось на блоки малых размеров в соответствии с наблюдениями.

Заключение

Полученное в работе аналитическое решение, соответствующее разрушению дрейфующего ледового поля изгибом при навале на наклонную грань широкого сооружения, позволяет эффективно оценивать значения нагрузок для различных сценариев взаимодействия. В рамках модели плавающей балки-полоски и плавающей пластинки на упругом основании характерные размеры блоков льда на порядок больше толщины льда. Подобное может наблюдаться лишь на ранних стадиях формирования нагромождения, размеры блоков отвечают положению сечений с максимальным изгибающим моментом.

Для разрушения края поля в навале более характерны размеры блоков от 1-го до 5-ти толщин льда. Для более полного соответствия рассматривается модель, где разрушение края поля происходит внутри образуемого нагромождения в результате непосредственного силового взаимодействия надводной и подводной частей навала с ледовым полем, т.е. там, где вертикальные нагрузки имеют значения на порядок превышающие нагрузку при контакте с гидравлическим основанием.

Литература

1. Croasdale, K.R., Cammaert, A.B. and Metge, M. A method for the calculation of sheet ice loads on sloping structures. IAHR Ice Symposium, Trondheim, Norway, 1994.
2. Maattanen, M. Test cone project. Proc. POLARTECH, Espoo, Finland, 1986.
3. Ralston, T.D. Plastic limit analysis of sheet ice loads on conical structures. UITAM Ice Symposium, Copenhagen, 1980
4. Невель Д.Е. Изгиб и потеря устойчивости клина на упругом основании. Новое в зарубежной науке. Вып.30. Физика и механика льда. М. Мир, 1983, с.272-291.
5. Sodhi D.S. Buckling analysis of wedge-shaped floating ice sheets. POAC. Trondheim, Aug.1979
6. Вершинин С.А., Трусков П.А., Кузьмичев К.В. Воздействия льда на сооружения Сахалинского шельфа, М.: Ин-т Гипростроймост, 2005.-208с.
7. API RP 2N 1993. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Structures and Pipelines for Arctic Conditions. American Petroleum Institute, Washington
8. Марченко А.В. Метод расчета ледовых нагрузок при навале льда на неподвижную стенку. ПММ, 2006, т.70, в.3, с.427-439
9. Марченко А.В., Карулин Е.Б. Метод расчета ледовых нагрузок от дрейфующего льда на широкое сооружение. Тр. ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова, Санкт-Петербург, 2005, Вып. 24 (308), с. 27-40.
10. Parmeter, R.R. and Coon M.D. Model of pressure ridge formation in sea ice. Journal of Geophysical Research, 1972., Vol. 77, 33: 6565-6575.
11. Alexeev, Y.N. and Karulina, M.M. 1998. A numerical prediction method for ice loads on wide sloping offshore structures//Ice in surface waters. Ed.Shen H.T. Rotterdam: Balkema, 1998. P.511-517
12. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин, оболочек. М., Наука, 1978
13. Timco G.W., Weeks W.F. A review of the engineering properties of sea ice. Cold Reg.Science and Tech., 2010, 6, p.107-129
14. Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е. Морской лед. Л.: Гидрометеиздат, 1975, 318с.

15. Dempsey J.P., Slepian L.I., Shekhtman I.I. Radial cracking with closure. Int.J.Fracture, 1995, v.73, p.233-261
16. Карулина М.М. Метод оценки глобальных ледовых нагрузок на широкие сооружения с плоской наклонной гранью. Труды ЦНИИ им. акад. Крылова, 2015, вып. 86 (370), с.117-124.
17. Sodhi, D.S. Vertical penetration of floating ice sheets. International Journal of Solids Structures, 1998, 35 (31-32). P. 4275-4294.

References

1. Croasdale, K.R., Cammaert, A.B. and Metge, M. A method for the calculation of sheet ice loads on sloping structures. IAHR Ice Symposium, Trondheim, Norway, 1994.
2. Maattanen, M. 1986. Test cone project. Proc. POLARTECH, Espoo, Finland
3. Ralston, T.D. Plastic limit analysis of sheet ice loads on conical structures. UITAM Ice Symposium, Copenhagen, 1980
4. Nevel' D.E. Izgib i poterya ustoychivosti klina na uprugom osnovanii. Novoe v zarubezhnoy nauke. Vyp.30. Fizika i mekhanika l'da. M. Mir, 1983, s.272-291.
5. Sodhi D.S. Buckling analysis of wedge-shaped floating ice sheets. POAC. Trondheim, Aug.1979
6. Vershinin S.A., Truskov P.A., Kuz'michev K.V. Vozdeystviya l'da na sooruzheniya Sakhalinskogo shel'fa, M.: In-t Giprostroymost, 2005.-208s.
7. API RP 2N 1993. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Structures and Pipelines for Arctic Conditions. American Petroleum Institute, Washington
8. Marchenko A.V. Metod rascheta ledovykh nagruzok pri navale l'da na nepodvizhnyuyu stenku. PMM, 2006.t.70, v.3, s.427-439
9. Marchenko A.V., Karulin E.B. Metod rascheta ledovykh nagruzok ot dreyfuyushchego l'da na shirokoe sooruzhenie. Tr. TsNII im. akad. A.N.Krylova, Sankt-Peterburg, 2005, Vyp. 24 (308), s. 27-40., t.70, v.3, s.427-439.
10. Parmeter, R.R. and Coon M.D. Model of pressure ridge formation in sea ice. Journal of Geophysycal Research, 1972., Vol. 77, 33: 6565-6575.
11. Alexeev, Y.N. and Karulina, M.M. 1998. A numerical prediction method for ice loads on wide sloping offshore structures//Ice in surface waters. Ed.Shen H.T. Rotterdam: Balkema, 1998. P.511-517
12. Timoshenko S.P. Ustoychivost' sterzhney, plastin, obolochek. M., Nauka, 1978
13. Timco G.W., Weeks W.F. A review of the engineering properties of sea ice. Cold Reg.Science and Tech., 2010, 6, p.107-129
14. Doronin Yu.P., Kheysin D.E. Morskoy led. L.: Gidrometeoizdat, 1975, 318s
15. Dempsey J.P., Slepian L.I., Shekhtman I.I. Radial cracking with closure. Int.J.Fracture, 1995, v.73, p.233-261
16. Karulina M.M. Metod otsenki global'nykh ledovykh nagruzok na shirokie sooruzheniya s ploskoy naklonnoy gran'yu. Trudy TsNII im. akad. Krylova, 2015, vyp. 86 (370), s.117-124.
17. Sodhi, D.S. Vertical penetration of floating ice sheets. International Journal of Solids Structures, 1998, 35 (31-32), P.4275-4294.

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

Александр Николаевич Сахаров, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теории пластичности механико-математического факультета МГУ им.М.В.Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, e-mail:alexandr.sakharov@math.msu.ru

Alexandr N. Sakharov, Ph.D.(Phys & Math), assistant professor cathedra Theory of Plasticity Mech & Math Faculty Lomonosov Moscow State University, 119991, Russia, Moscow, Lenynskie gory,1, e-mail: alexandr.sakharov@math.msu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 29.04.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 06.06.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 22.06.2022

Научная статья

УДК 622.276/279.04; 627.034/539.42; 551.326/620.178.742; 626.01

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.053>**Разработка методологии расчета параметров циклической ледовой нагрузки от ледовых полей на морские объекты**В.Г. Цуприк¹ tsuprik.vg@dvfu.ru;¹Дальневосточный федеральный университет

Аннотация. Опыт возведения и эксплуатации стационарных морских нефтегазодобывающих платформ, также как и эксплуатации ледоколов однозначно показал, что такие объекты могут испытывать критические вибрации от пиковых нагрузок в процессе циклического разрушения ровных ледовых полей. В работе, на основании энергетической модели явления разрушения льда, как термодинамического процесса, с учетом его структуры и реологии, представлено математическое описание закономерностей формирования циклической ледовой нагрузки как динамического процесса нарастания напряженно-деформированного состояния локального объема льда и его разрушения. За основу разрабатываемой методологии взят энергетический критерий – критическое значение плотности удельной энергии упругой деформации единичного объема льда, вызывающее и интегрально учитывающее и описывающее все виды его механического разрушения. Этот критерий является «встроенным в структуру льда» природным регулятором возможного значения пика контактной силы и продолжительности цикла накопления упругой энергии в его объеме до разрушения, а также триггером, запускающим спонтанный нерегулируемый процесс динамического разрушения. В работе методологически обоснован алгоритм определения требующихся для моделирования динамического поведения основания платформы параметров циклической ледовой нагрузки

Ключевые слова: шельф; платформы; морской лед; реология льда; разрушение льда; ледовые нагрузки; энергетическая модель; критерий разрушения; методология исследования

Для цитирования: Цуприк В.Г. Разработка методологии расчета параметров циклической ледовой нагрузки от ледовых полей на морские объекты, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 3, С. 122—131. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.053

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.053>**Development of methodology for calculating parameters of cyclic ice load from ice fields on marine objects**Vladimir G. Tsuprik¹ tsuprik.vg@dvfu.ru;¹Far Eastern Federal University

Abstract. Experience in the construction and operation of stationary offshore oil and gas production platforms, as well as the operation of icebreakers, has clearly shown that such objects can experience critical vibrations from peak loads during the process of cyclic ice destruction. The paper, based on the energy model of the phenomenon of ice destruction as a thermodynamic process, taking into account its structure and rheology, there is a mathematical description of the regularities of the formation of a cyclic ice load as a dynamic process of increasing level the stress-strain state of ice local volume and its destruction. The developed methodology is based on the energy criterion – the critical value of the density of the specific elastic energy of deformation of a single volume of ice, which causes and integrally takes into account and describes all types of its mechanical destruction. This criterion is "built into the ice structure" a natural regulator of the possible value of the peak of the contact force and the duration of the cycle of accumulation of elastic energy in its volume until destruction, as well as a trigger that triggers a spontaneous unregulated process of dynamic destruction. The paper methodologically substantiates an algorithm for determining the parameters of cyclic ice load required for modeling the dynamic behavior of the platform

Keywords: shelf; platforms; sea ice; ice rheology; ice destruction; ice loads; energy model; destruction criterion; research methodology

For citation: V. Tsuprik, Development of methodology for calculating parameters of cyclic ice load from ice fields on marine objects, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 3, P. 122—131. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.053

Введение.**Параметры циклического процесса воздействия льда – исходные данные для динамического расчета морских ледостойких сооружений на прочность**

Причиной возникновения циклической ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения является природный феномен периодического разрушения льда на кромке движущегося ледового поля (ЛП) при

контакте с поверхностями жестких объектов. Это явление в первой монографии по воздействию льда на инженерные сооружения Коржавин К.Н. [1] охарактеризовал так: «В период врезания опоры в льдину ... отмечается пульсация скорости, а следовательно и давления, связанная с естественным процессом разрушения льда». И далее, здесь же: «... процесс разрушения ледяного покрова отличается большой сложностью и ... носит периодический характер...».

Результаты инструментальных исследований такого процесса показаны в работах Коренькова В.А. [1], и ряда зарубежных исследователей [3,4], зафиксировавших аналоговый сигнал, характеризующий процесс прорезания жесткой опорой ЛП как «пульсацию ледовой силы», с помощью тензометрических плит, закрепленных на бычках водосливной части плотин, опор мостов или измерительных свай.

Процессу формирования ледовой нагрузки во времени на *морские ледостойкие сооружения* (МЛС) долгое время не уделялось должного внимания, пока в течение 1961- 77 г.г. не появились факты разрушения ряда стационарных морских объектов: пяти установленных в заливах Балтийского моря маяков [5] и 2-х решетчатых металлических оснований платформ в Бохайском заливе Желтого моря [6], а также сдвига железобетонного основания платформы в Азовском море. Во всех этих случаях было однозначно установлено, что причиной разрушений явилось возникновение значительных и опасных вибраций эксплуатируемых платформ вследствие длительного процесса циклического разрушения льда на поверхности опор сооружений. К этому же ряду проблем обеспечения прочности и устойчивости морских ледостойких оснований буровых платформ относится и случай вибрации стационарного массивного кессонного основания буровой платформы Molikraa, установленной в море Бофорта на насыпном песчано-гравийном основании с посадочной глубиной основания 15 м. В работе [7,8] и др. описано, что, несмотря на колоссальные размеры (111х111 м²) и огромную массу (54 тыс. т), основание платформы, подвергнутое зимой 1985-86 г. воздействию циклической ледовой нагрузки от прорезания дрейфующего поля многолетнего льда размером 1 х 2 км в течение 30 минут, сооружение, в результате колебаний с амплитудой порядка 10 мм с частотой 0,5–3,0 Гц получила критическое состояние, близкое к потере устойчивости на сдвиг по поверхности грунта основания [8]. В последние годы при эксплуатации нефтяных платформ на шельфе Сахалина также столкнулись с проблемой деструктивного характера цикличности ледовой нагрузки и обеспечения прочности оснований этих уникальных сооружений [8,9].

Для решения задач, поставленных для достижения цели исследования, также важно отметить, что *параметры циклического характера действия льда* на сооружения являются главными расчетными исходными параметрами для выполнения *усталостных расчетов* элементов МЛС при определении их надежности и долговечности, поэтому актуальность данной проблемы остается высокой по двум причинам. Во-первых, из-за перспектив развития темпов и масштабов освоения шельфовых акваторий в промышленных целях. Во-вторых, из-за отсутствия решения этой проблемы на уровне нормативных документов, не регламентирующих расчеты параметров цикличности ледовой нагрузки на сооружения, в то время как этого требуют стандарты динамического расчета конструкций сооружений.

1. Место расчетной модели циклической ледовой нагрузки на МЛС в схеме его динамического расчета

Согласно рассмотренной в ряде ранее опубликованных работ автора системе обеспечения надежности МЛО с учётом обеспечения вариантного проектирования для заданных условий и критериев оценки модели результата проекта, потребность достижения проектной надежности ледостойкой платформы, в первую очередь, обуславливает цель разработки метода расчета ледовой нагрузки на ее конструкцию для выполнения динамического расчета МЛС. Действующий Межгосударственный стандарт «Надежность строительных конструкций и оснований» [10], регламентирует выполнение следующих расчетов:

- определение *частот собственных колебаний сооружений* и сравнение их с частотой вынужденных колебаний с целью исключения возможности появления резонанса путем изменения параметров сооружения;
- определение максимальных расчетных усилий (напряжений), возникающих в элементах конструкций *в процессе колебаний сооружений* и их сравнение с предельно допустимыми величинами по условиям прочности, устойчивости и выносливости;
- определение *динамических перемещений* и сравнение их с предельно допустимыми значениями, установленными нормами.

Кроме того, стандарт [10] регламентирует, в частности, что для оценки реакции строительного объекта при динамических воздействиях требуется «использовать динамические расчетные модели... (расчетные схемы), содержащие: расчетные модели нагрузок и воздействий, включающие в себя их *интенсивность (величину)*, *закон изменения нагрузки по времени или частоты ... или спектральные характеристики (энергетический спектр...)*».

На Рис.1 показана условная схема методологически взаимосвязанных элементов системы расчета надежности проектируемого МЛС. Здесь показано, что последовательная реализация всех элементов разрабатываемой в данном исследовании методологии «работает» на модель расчета параметров цикличности ледовой нагрузки, для дальнейшего их применения в динамическом расчете сооружения.

В соответствии с представленной на Рис. 1, схемой определения прочностной надежности МЛС по данным его динамического расчета, метод расчета параметров цикличности ледовой нагрузки реализует ее *расчетную модель*, которая должна базироваться на принятой расчетной модели разрушения льда на контакте с конструкцией сооружения с соответствующим такой модели критерием разрушения льда. В данном случае базовым условием настоящей задачи является принятое априори условие, что из двух элементов, взаимодействующих в системе ЛП – МЛС, второй должен оставаться не разрушаемым, потому что его жесткость (прочность, устойчивость) всегда должна превосходить жесткость (интегральную прочность) льда в зоне контакта.

Основной задачей прикладной механики разрушения считается, что «Анализ напряженно-деформированного состояния (объема льда – авт.)

«на прочность» должен дать описание механизма разрушения: критерий, порядок возникновения и геометрические характеристики отдельных трещин в области разрушения» [11]. Следовательно, для моделирования разрушения льда на контакте с МЛС при его проектировании, уже изначально объектом исследования должен быть механизм разрушения

льда (тип, схема разрушения), а критерий его разрушения – предметом исследования. На Рис.2 приведены результаты анализа механизмов разрушения льда, описанных в опубликованных исследованиях, а также соответствующие им расчетные модели и вид графиков ледовой нагрузки.

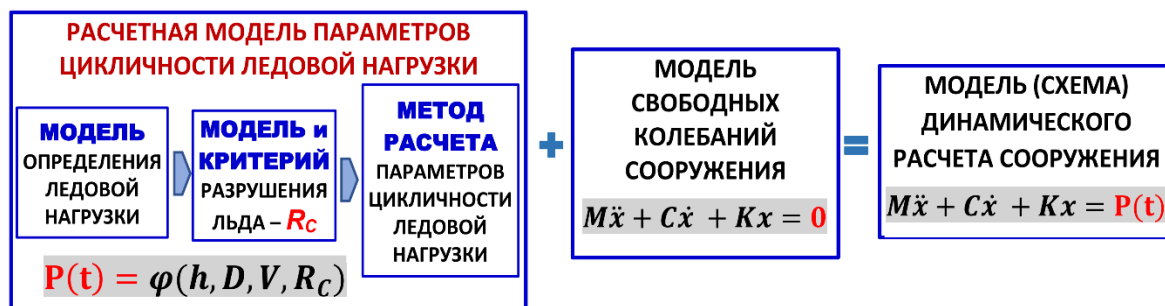


Рис. 1. Общее представление методологически взаимосвязанных элементов системы расчета надежности проектируемого МЛС

2. Механизм разрушения льда – основа модели ледовой нагрузки на МЛС

Механизм разрушения льда, как наиболее информативная материальная метрическая субстанция, характеризующая результаты реализации достижения критических характеристик напряженно – деформированного состояния *локального объема льда*, экспериментально изучался многими учеными различными способами на протяжении нескольких десятилетий и подобные работы продолжают и в настоящее время. На рисунке 2 приведены основные данные по аналитическому обзору результатов многих исследований: реальные картины разрушения льда на контакте с моделями опор (а); схемы для расчетных моделей ледовой нагрузки (б); диаграммы изменений контактных сил в эксперименте (в). Во всех рассмотренных работах показано, что на характер разрушения льда оказывает влияние, в первую очередь, его прочность на сжатие σ_0 , а также соотношение ширины сооружения и толщины льда ЛП B/h .

Анализ представленных результатов исследований механизмов разрушения льда показывает, что используемая в нормативной методике [12] модель «непрерывного и равномерного» разрушения льда на контактной поверхности (Рис. 3а) и составленные на их основе расчетные модели вида (1) изначально не предназначались для моделирования циклических ледовых нагрузок и не могут быть использованы для этих целей, т.к. в реальных условиях механизм разрушения льда на контакте – это сложный, состоящий из нескольких самостоятельных процессов, развивающихся во времени параллельно-последовательно, комплексный процесс разрушения массива ледовой плиты на некоторую глубину в процессе развития вертикальных радиальных и горизонтальных расщепляющих трещин, кольцевых сдвиговых трещин и сплошного трещинообразования – дробления – смятия льда на контактной поверхности льда с сооружением. (Рис. 3, б).

Описывающая принятую в нормативных методах расчетную «модель предельного состояния»,

изображенную на Рис. 3а, формула определения силы ледового давления на опору МЛС представляет классическое описание прочности плоского сечения материала в напряженном элементе конструкции при ее статическом нагружении в виде:

$$F_{ЛП} = m \cdot R_c \cdot B \cdot h \text{ (кН)}, \quad (1)$$

где: $m = k_i \cdot k_j \cdot k_k \cdot k_n$ – «коэффициенты соответствия», учитывающие скорость ЛП, солёность льда, форму опоры МЛС и плотность ее контакта со льдом.

Очевидно, что формула (1) может дать только *максимальное постоянное (статическое)* значение ледовой нагрузки на МЛС путем подстановки в нее соответствующих расчетных параметров, в частности – призмочной прочности льда на сжатие σ_0 в R_c , что не учитывает реального комплекса процессов *сложного механизма* развития множества трещин различной природы и всего комплекса явлений разрушения льда *во времени* (Рис. 3б). Исходя из этого, можно констатировать, что существующие нормативные методы не базируются на описании физических процессов разрушения льда, а являются детерминированными эмпирическими моделями, которые понятие «критерий разрушения» не используют в принципе, но позволяют с помощью варьирования факторных коэффициентов моделировать пики ледовых сил на сооружении.

Из данных выполненного анализа состояния исследования проблемы определения параметров цикличности ледовой нагрузки на МЛС, можно констатировать, что для адекватного описания динамического процесса воздействия ЛП на МЛС *необходима новая методология*, постулирующая принципы, модели и методы получения количественных параметров процесса циклического разрушения льда в целях обеспечения расчетной надежности МЛС при циклических нагрузках.

Она должна описывать динамический процесс воздействия ЛП на МЛС на основе учета физических законов разрушения морского льда, как *многофазной среды с реологически сложным механическим поведением*.

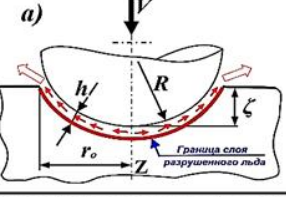
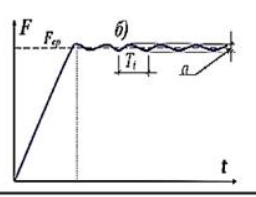
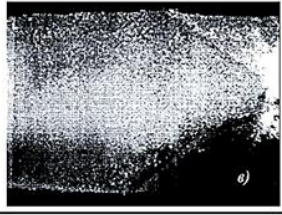
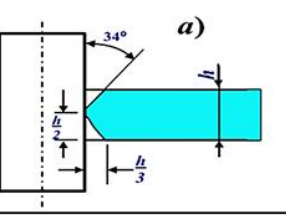
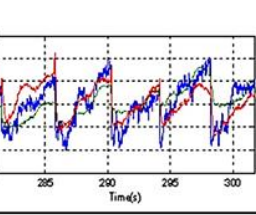
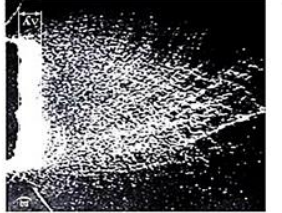
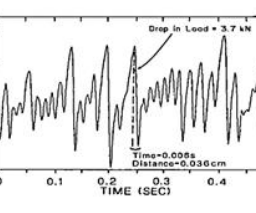
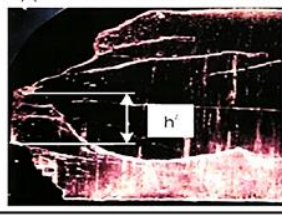
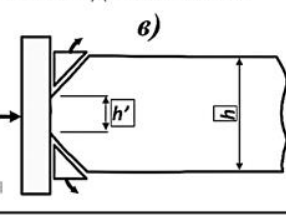
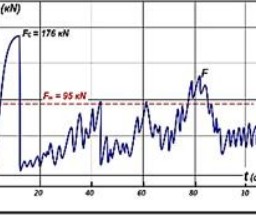
ТИП МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА	РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ (СХЕМА)	ВИД ГРАФИКА ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ	ЛИТЕРАТУРНЫЕ ИСТОЧНИКИ
СПЛОШНОЕ СМЯТИЕ ПО ВСЕЙ ТОЛЩИНЕ ПЛИТЫ 			Хейсин и др. (1976); Frederking и др. (1990); Tukhuri и Riska (1994); Karna и др. (2000); Shkhinek и др. (2001); Yue, Guo, Kärnä (2009); Wang и др. (2014); и другие
СДВИГИ «КЛИНЬЕВ» СВЕРХУ И СНИЗУ ЛЕДОВОЙ ПЛИТЫ 			Croasdale и др. (1970); Neill G.R. (1970); Schwarz (1974); Кореньков (1973, 1976); Вершинин и др. (1973, 1975); Kry (1980); Taylor (1981); Саёки, Озаки (1983); Sodhi и Morris (1986); Yue и др. (2009)
РАСТРЕСКИВАНИЕ СО СМЯТИЕМ И ЭКСТРУЗИЕЙ 			Kärnä и Turunen (1989); Jordaan and Timco (1987, 1988); И другие
СДВИГИ «КЛИНЬЕВ» И СМЯТИЕ СРЕДНЕГО КЛИНА 			Croasdale и др. (1977); Taylor (1981); Храпатый, Цуприк (1979); Timco (1987); Sodhi (1988); Muhonen (1992); Johnston и др. (1998); Jordaan (2001); Li и др. (2006); Вершинин и др. (2006)

Рис. 2. Механизм разрушения льда в массиве ЛП при его прорезании опорой сооружения как источник цикличности ледовой нагрузки на МЛС

3. Энергетическая концепция разрушения льда

В механике разрушения доказано и общепринято, что источником энергии разрушения в «эпоху после Гриффитса», является упругая энергия деформированного тела [13–20]. Поэтому *энергетический подход* к определению параметров цикличности ледовой нагрузки на МЛС основывается на основном законе термодинамики – законе сохранения энергии [19]. Структурно-энергетическая интерпретация процесса упруго-пластического деформирования напряженного объема льда предполагает [13,17,20], что поток кинетической энергии от ЛП в процессе его действия на жесткую неподвижную опору МЛС, создает приток энергии $U(t)$ в массив льда, прилегающий к зоне контакта. Учитывая пространственную природу распространения волны напряжений в твердых телах, определяющим положением в динамической концепции разрушения считается, что «Для подвода нужного количества энергии к дефектам как раз необходимо ... время, за которое возле них пройдет «эффективная» часть импульса и сообщит необходимую часть энергии для роста трещины» [11].

Следовательно, разрушение льда следует рассматривать как с позиции статистической физики

как многоэтапного, пространственно – временного процесса накопления и развития нарушений сплошности материала [13–17], так и с позиций механики разрушения и феноменологической термодинамики [18,19]. Эти два подхода к описанию процесса разрушения, опираясь на фундаментальные законы сохранения, показывают, что внешняя сила не сама разрывает внутренние связи, а лишь активизирует процесс их *разрыва энергетическими флуктуациями*, обеспечивая направленность разрывного действия флуктуаций и развитие процесса разрушения, как протекающего во времени единого процесса *накопления нарушений* в структуре льда и *накопления упругой энергии* в его кристаллах [13,14,16,17,19,19,27].

Напряженная силой контактного давления часть массива (его напряженный объем) работает по схеме интегратора - накопителя и распределителя поступающей в объем энергии деформации, которая может быть аддитивно разложена: на неупругую, распределенную на новые поверхности при росте многих небольших микродефектов и острых микротрещин; на упругую, частично накапливающуюся на поверхностях более крупных дефектов структуры и в упруго деформируемых кристаллах на уровнях атомной решетки. Часть энергии

рассеивается в массиве льда в виде тепла, поэтому определяющую роль в формировании механизмов его деформирования и разрушения играет его структура, текущее физическое состояние и граничные и начальные условия процесса.

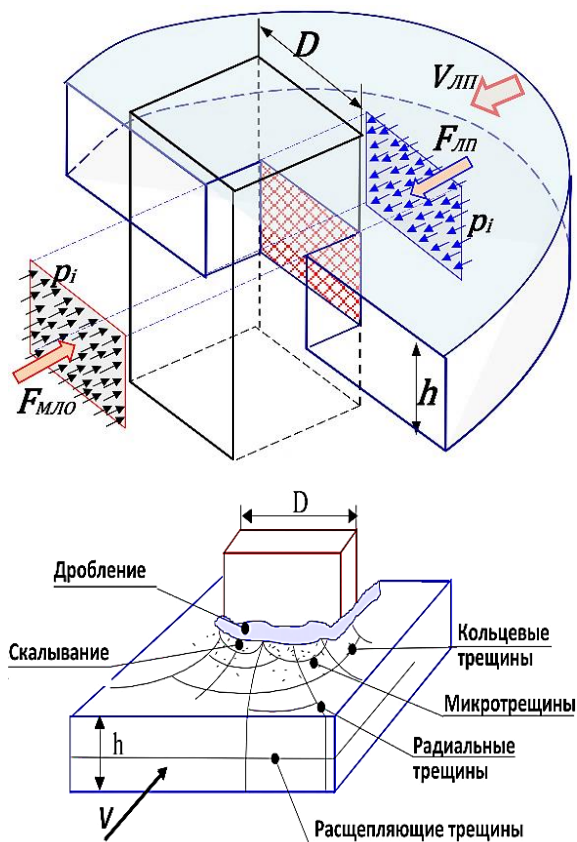


Рис. 3. Схемы моделей разрушения льда:

- а) – условно принятая в российском нормативном документе [12];
б) – реальная по исследованиям многих авторов по [1-4, 9, 21-24]

3.1. Феноменология морского льда, определяющая его реологию. Теоретический анализ

Основным фактором, определяющим общую деформацию льда, является, прежде всего – образование хрупких микроразрушений в множестве внутренних дефектов его структуры, после чего развивается макропроцесс (коалиценции) множества элементарных нарушений в структурных элементах льда в виде разрыва межмолекулярных и молекулярных наиболее слабых внутренних связей [13, 14, 16, 20, 27] и пластические проскальзывания по границам кристаллов во всем напряженном объеме льда W_{cr} (Рис. 4а). Соотношение между упругими (хрупкими) и пластическими (вязкими) процессами, их относительная роль в объемном деформировании льда характеризуется показателем его хрупкости [13].

Таким образом, тип разрушения льда по вязкому (б); упруго-пластическому (с) или упруго-хрупкому (д) механизму (Рис. 4) будет отражать характер распределения переданной в процессе нагружения напряженной области внешней энергии,

определяемый температурой льда и скоростью ЛП, что следует из результатов многих экспериментов (Рис. 2). Здесь следует специально заметить, что именно энергетический подход к описанию явления разрушения дает возможность оценки типа (характера) разрушения, в то время как «силовые» критерии разрушения, основанные исключительно на напряжениях, не могут отразить различия между упругими и пластическими деформациями, поскольку для напряжений не существует различия «упругих» или «пластических».

Согласно показанным здесь особенностям деформирования морского льда под нагрузкой, энергия $U(t)$ (Рис. 4, кривая 1) – работа сил сопротивления структуры льда в его напряженном объеме, произведенная при внедрении в него опоры сооружения, в каждый момент времени распределена в виде двух ее составляющих, имеющих характерные особенности изменения в течение процесса и находящиеся в равновесии до момента разрушения. Уравнение энергетического баланса в единичном объеме льда в процессе его загрузки запишется в общепринятом виде [Ошибка! Источник ссылки не найден. Ошибка! Источник ссылки не найден.] как разница :

$$U_e(t) = U(t) - U_d(t), \quad (2)$$

где $U_e(t)$ – накопленная в структурных элементах льда энергия упругой деформации (Рис. 4, кривая 3), которая должна будет вызвать разрыв связей структуры и начало разрушения в напряженном объеме; $U_d(t)$ – энергия диссипации, затраченная на пластические деформации как в кристаллической решетке, так и в текстуре льда (межкристаллические прослойки поры, примеси, ячейки с рассолом, кристаллы солей), а также переданная в виде тепла окружающему массиву льда в результате работы пластических деформаций (Рис. 4, кривая 2).

С учетом феноменологических особенностей строения морского льда при его деформировании процесс передачи внешней энергии будет идти непрерывно, а накопления потенциальной упругой энергии всегда будет неравновесным [13, 15, 19, 27]: даже при незначительных упругих напряжениях в теле часть упругой энергии будет скачками диссипировать как в виде актов пластических микросдвигов, так и актов хрупких микроразрывов (микротрещин отрыва) [14] в элементах структуры льда и ее уплотнения, рекристаллизации, слияния или выдавливания дефектов, пор и пр. (Рис. 5), что характерно и для других материалов [14, 16, 19, 25, 27].

Поэтому уравнение (2) является описанием типа разрушения льда. Так, при медленном нагружении теплого льда практически вся передаваемая льду энергия успевает рассеиваться, практически минуя упругую стадию: $U_d(t) \equiv U_e(t)$, тогда сопротивление льда внедрению тела $U(t) \rightarrow 0$. В данном случае лед будет работать по схеме вязкого деформирования или текучести, т.е. без характерного развития трещин – «не разрушаясь», просто распадаясь на кристаллы, например (Рис. 4, б). Но при низких температурах и высокой скорости дрейфа ЛП $U_d(t) \rightarrow 0$ и $U(t) \rightarrow U_e(t)$ тогда лед будет разрушаться хрупко, с образованием блоков между трещинами (Рис. 4, д). Элементарный анализ показывает, что уравнение (2) описывает все характерные виды разрушения льда в диапазоне от вязкого до хрупкого.

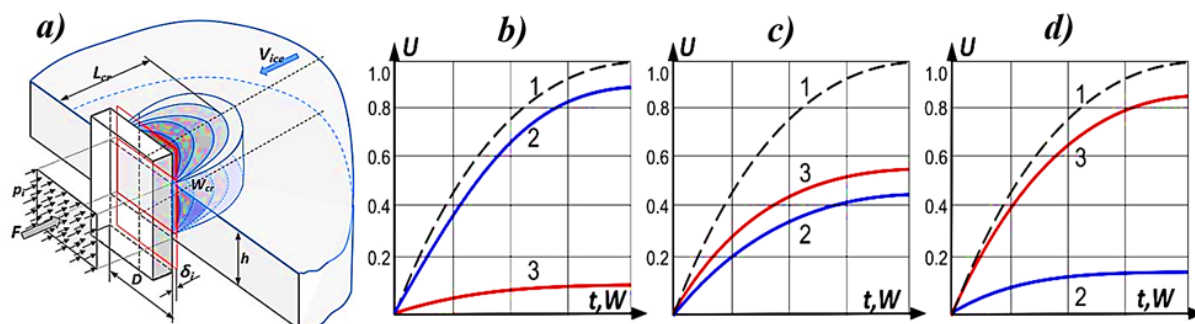


Рис. 4. Упруго напряженный объем льда перед опорой и характерные виды распределения переданной этому объему энергии к моменту его разрушения в зависимости от температуры льда и скорости ЛП

3.2. Критерий разрушения льда, определяющий момент разрыва структурных связей

Физическое состояние льда, как материала, всегда характеризуется плотностью удельной энергии его элементарного объема u_0 , [17,19,20], численное значение которой изменяется в соответствии с изменениями внешних условий: оно будет снижаться при повышении температуры льда и расти при деформировании под действием внешней нагрузки по схемам, показанным на Рис. 4 и Рис. 5. Поскольку лед – уникальный материал, существующий в природе вблизи температур его фазовых переходов, изменение его температуры на несколько градусов может кардинально изменить его реакцию на приложенную нагрузку.

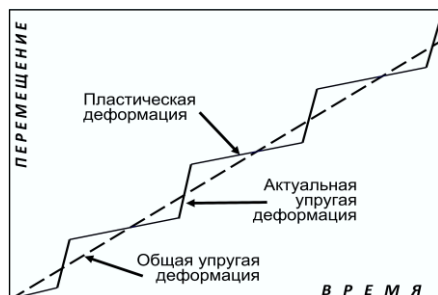


Рис. 5. Идеализация процесса роста деформаций в напряженном объеме льда при нарастании внешней нагрузки по Jordaan J. [26] и другим

Поэтому, в соответствии с данными термодинамического анализа процесса деформирования твердого тела [19], в рассматриваемой модели разрушения морского льда параметр u_0 предлагается считать однозначной интегральной характеристикой напряженного состояния его единичного объема, а ее текущее значение в таком объеме для неизменной в течение времени $t_*(t_0 + \Delta t)$ температуры представляется уравнением интегратора:

$$u(\bar{r}_*, t_*) = u_0 + \Delta u(\bar{r}_*, t_*), \quad (3)$$

где u_0 , плотность внутренней энергии льда в недеформированном состоянии; $\Delta u(\bar{r}_*, t_*)$ – приращение значения плотности внутренней энергии в локальном объеме льда за время его деформирования Δt ; $\bar{r}_*$ – координаты локального объема льда в пределах деформированного макрообъема W_{cr} (Рис. 4а).

Ключевой момент в процессе деформирования конкретного единичного объема W_{cr} во всем нагружаемом локальном объеме льда в контактной зоне ЛП с МЛС – момент его разрушения, триггером запуска которого является критерий разрушения. В энергетической концепции разрушения твердого тела [17,19,20] критерием является критическое значение плотности удельной энергии упругого деформирования его единичного объема u_{cr} , определяемое формулой (3) при достижении максимального в цикле нагрузки значения $\Delta u(t)$. Обоснование и описание такого рода критерия наступления разрушения, впервые введенное А. Гриффитсом [15,18,20] для развития плоского дефекта – трещины, было развито и дополнено для объемного напряженного элемента работами ряда исследователей [17,19,20].

Так, для льда, как и для других материалов, существует определенное предельное значение скорости поглощения (рассеяния) энергии внешнего воздействия в объеме, не превышение которого не нарушает энергетического равновесия всех элементов структуры и включений. Достижение плотностью удельной энергии такого критического значения u_{cr} в единичном объеме вызовет разрушение наиболее слабого микрообъема льда и лавинообразный разрыв связей между элементами его структуры. Источником внешней энергии для этого единичного объема льда, является энергия упругого деформирования $U_e(t)$ всего напряженного объема льда. Условие наступления разрушения можно записать с использованием уравнений (2) и (3) для единичного напряженного объема льда в виде:

$$\frac{\Delta u_e(\bar{r}_*, t)}{dt} = \left(\frac{du(\bar{r}_*, t)}{dt} - \frac{du_0(\bar{r}_*, t)}{dt} \right) \leq 0. \quad (4)$$

Для наглядности протекания процесса, уравнения (3) и (4) могут быть интерпретированы графически (Рис.6 а). Из уравнения (2) следует, что значение (объем) накапливаемой в напряженном объеме льда упругой энергии есть разница всей энергии, поступающей в него и энергии, диссипировавшей в структуре льда.

Предельным значением плотности удельной энергии, вызывающей разрушение льда, согласно уравнению (3), является значение u_{cr} (Рис. 6а – точка X). Работа критерия по формированию циклического процесса разрушения льда показана на Рис. 6б, где приведена графическая интерпретация уравнения (4), описывающего во времени функционирование механизма регулирования

энергетического обмена между ЛП и МЛС следующим образом.

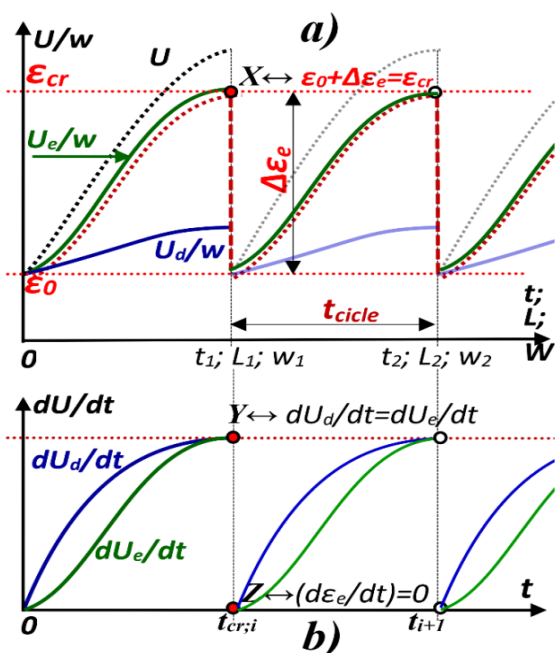


Рис. 6. Структурно–энергетическая интерпретация процесса формирования механизма циклического разрушения льда при взаимодействии ЛП с МЛС

В процессе воздействия ЛП на опору сооружения, при постоянной скорости ЛП и неизменных геометрических параметрах задачи, разность в правой части уравнения (4) обратится в ноль только при одном условии: когда в некотором микрообъеме льда в массе других, составляющих деформируемый макрообъем в зоне контакта, к моменту времени t_{cr} рост скорости поглощения (диссипации) льдом энергии ввиду исчерпания возможностей его структуры и текстуры деформироваться пластически снизится до нуля; кривая «насыщения» dU_d/dt закончится в точке Y (Рис. 6b).

К тому же моменту времени t_{cr} скорость прироста упругой энергии в напряженном объеме льда сравнивается со скоростью ее диссипации (Рис. 6b – точка Y), правая часть уравнения (4) обращается в ноль (точка Z на Рис. 6b). Это означает, что в процессе нагрузки льда достигнуто критериальное значение предела прочности единичного объема льда: $u_{cr} = u_0 + \Delta u_e$ (Рис. 6a; точка X) и в момент времени t_{cr} произойдет его мгновенное разрушение. Затем цикл нагрузки – разрушения повторится для очередного объема льда. Диаграмма процесса изображается пунктиром красного цвета пилообразной формы на рисунке 6a.

4. Использование u_{cr} в расчетах параметров цикличности ледовой нагрузки

Таким образом, критическое значение удельной энергии u_{cr} , упруго накопленной в сжимаемом объеме льда при его контакте с опорой сооружения рассматривается нами в данном исследовании в качестве феноменологического регулятора затрат

фиксированного значения (дозы) кинетической энергии ЛП системой ЛП-МЛС, достаточных для разрушения локального объема льда, а также регулятором частоты разрушения льда, являющейся причиной явления генерирования колебаний сооружения при циклическом воздействии на него нагрузки от ЛП.

Здесь параметр времени – один из основных параметров процесса, не только определяющий момент начала разрушения льда (t_{cr}) и начала высвобождения упругой энергии, накопленной в его объемах, но и характеризующий тип деформирования и разрушения морского льда его зависимостью от скорости прироста (мощности) упругой энергии в единичный объем льда. Поскольку упругая энергия $U_e(t)$ сжатия объема W_{cr} льда эквивалентна затраченной работе внешней силы $A = F \cdot L_{cr}$ на такое деформирование, время цикла разрушения можно достаточно точно определить из простых экспериментов, описанных в [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Большие образцы природного льда, выпиленные из ледового покрова перпендикулярно плоскости намерзания льда, при их испытаниях на динамическое сжатие, имеют механизм разрушения адекватный реальному процессу прорезания льда опорой сооружения. Метод испытания образца дает возможность получения цифрового ряда достаточной длины для определения статистически достоверных значений плотности удельной энергии разрушения льда u_{cr} и, с использованием ее численных значений в расчетном доверительном интервале, времени цикла разрушения льда и среднего значение контактной силы на некотором временном промежутке по формулам:

$$t_{cycl} = u_{cr} \cdot W_{cr} / \frac{\Delta u_e}{dt} \quad (5)$$

$$F_{midl} = u_{cr} \cdot D \cdot h \cdot \rho \cdot V(t) \cdot dt. \quad (6)$$

Максимальные расчетные значения пика контактной силы льда определяются с учетом значений среднеквадратичных отклонений, получаемых при обработке цифровых рядов динамических испытаний больших образцов льда.

Заключение

Существующая нормативная методика расчета ледовой нагрузки в целом обеспечивает определенную адекватность расчетов статической ледовой нагрузки на морские сооружения с вертикальной гранью, что обосновано многолетними и многогранными исследованиями. Но ее модификация для расчетов параметров динамичности ледовой нагрузки не представляется возможной ввиду явного несоответствия используемого в них условного критерия напряженного состояния массива льда в зоне его контакта с опорой сооружения.

Результаты работы дают основания рассмотреть целесообразность применения данной методологии расчета параметров динамичности ледовой нагрузки на МЛС с применением удельной энергии механического разрушения льда, как дополнения к существующей.

Литература

1. Коржавин, К.Н.. Воздействие льда на инженерные сооружения / К. Н. Коржавин // Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1962. – 224 с.
2. Кореньков, В. А. Натурные измерения динамического давления льда на бычок низконапорной плотины / В. А. Кореньков // Тр. коорд. совещаний по гидротехнике. Вып. 111. – Ленинград : Энергия, 1975. – С. 148–152.
3. Nevel, D. E. Ice forces on vertical piles / D. E. Nevel, R. E. Perham, G. B. Hogue // CRREL report. No. 77, 1977. – 10 p.
4. Schwartz J. The of floating ice-fields on piles// Proc. IAHR Ice Symp., Hanover, USA. 1975. Pp.373-386.
5. Bergdahl, L. Two lighthouses damaged by ice / L. Bergdahl // Proc. IAHR Symposium on Ice and Its Action on Hydraulic Structures. Leningrad. 1972. – P. 234-238.
6. Hou, J. Structural Design for the Ice-Resistant Platform / J. Hou, W. Shao // Proc. 24th Int. Ocean and Polar Engg Conference (ISOPE). Busan, 2014. – P. 1118-1124..
7. Jordaan, I. Re-evaluation of ice loads and pressures measured in 1986 on the Molikpaq structure / I.J. Jordaan, J. Bruce, K. Hewitt, R. Frederking // In: Proc. 21st Int. Port and Ocean Eng. under Arctic Condi. Conf. (POAC'11), Montréal, Canada, 2011. P.12.
8. Беллендир, Е. Н. Научное обоснование проектирования гравитационных опорных блоков морских ледостойких платформ и их сопряжения с грунтовым основанием. Автореф. дис... д-ра техн. наук. ВНИИГ. Санкт-Петербург, 2005. – 45 с.
9. Вершинин, С. А. Воздействие льда на сооружения Сахалинского шельфа // С. А. Вершинин, П. А. Трусков, К. В. Кузьмичев. – Москва : Институт Гипростроймост. 2005. – 208 с.
10. ГОСТ 27751-2014. Межгосударственный стандарт. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 14 с.
11. Никифоровский, В. С. Динамическое разрушение твердых тел / В. С. Никифоровский, Е. И. Шемякин. – Новосибирск : Наука, 1976. – 271 с.
12. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Свод правил, актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82*.
13. Соломатин, В. И. Структурные механизмы деформации льда / В. И. Соломатин // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477, № 4. С. 475–479.
14. Кузьменко, В. А. Новые схемы деформирования твердых тел /В.А. Кузьменко // Киев: Наукова думка, 1973. –200 с.
15. Си, Г. Математическая теория хрупкого разрушения / Г. Си, Г. Либовиц // Разрушение, Т.2. Математические основы теории разрушения; М.: Мир, 1975. – С.83–203.
16. Журков, С. Н. К вопросу о физической основе прочности / С. Н. Журков // ФТТ. Т. 22, № 11. 1980. С. 3344-3349.
17. Штырёв, Н.А. Структурно-энергетическая кинетическая теория прочности твердой среды (Деформирование и разрушение твердых тел с позиций кинетической структурно-энергетической теории) / Н.А. Штырев // Пятая международная НТК “Турбо-2014”, Киев, ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины. 2014, 55 с..
18. Черепанов, Г. П. Механика хрупкого разрушения / Г. П. Черепанов. – Москва : Наука, 1974. – С. 486-494.
19. Фёдоров, В. В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твёрдых тел / В. В. Фёдоров. – Ташкент: Фан, 1979. – 168 с.
20. Мешков, Ю. Я. Концепция критической плотности энергии в моделях разрушения твердых тел / Ю. Я. Мешков // Успехи физики металлов (Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины). Т. 2. Киев, 2001. С. 7–50. Timco, G. W. (1987). Indentation and Penetration of Edge-Loaded Freshwater Ice Sheets in the Brittle Range. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 109(3), 287. Doi:10.1115/1.3257022
21. Храпатый, Н. Г. Полунатурные исследования динамического воздействия льда на опоры гидротехнических сооружений / Н. Г. Храпатый, В. Г. Цуприк // Ледотермические явления и их учёт при возведении и эксплуатации гидроузлов и гидротехнических сооружений : материалы конференций и совещаний по гидротехнике. – Ленинград : Энергия, 1979. – С. 101-104.
22. Croasdale, K. R. Indentation tests to investigate ice pressures on vertical piers / K. R. Croasdale, N. R. Morgenstern, J. B. Nuttall // J. Glaciology, 19(81), 1977. – P. 309-312.
23. Taylor T.P. An experimental investigation of the crushing strength of ice// Proc. POAC Conf., Quebec, 1981, pp.332-345.
24. Hirayama, K. Ice forces on vertical piles / K. Hirayama, J. Schwarz, H. C. Wu // Proc. IAHR Ice Symposium. Hanover, USA. 1975. – P. 429-441.
25. Войтковский, К. Ф. Механические свойства льда / К.Ф. Войтковский. – Москва: Изд-во ПН СССР, 1960. – 100 с.
26. Jordaan, I. J. Mechanics of ice-structure interaction //J/ Jordaan // Eng/ Fracture Mechanics, 2001, 68. P. 1923-1960.
27. Зарецкий, Ю. К. Вязкопластичность льда и мерзлых грунтов / Ю. К. Зарецкий, Б. Д. Чумичев, А. Г. Щеболев. – Новосибирск : Наука, СО РАН, 1985. – 185 с.
28. Tsuprik, V. G. Experimental Researching of the Specific Energy Mechanical Fracture of Ice by Method of Uniaxial Compression of Samples / V. G. Tsuprik, A. T. Bekker, E. E. Pomnikov et al. // Proc. 24rd Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), Busan, Korea. 2017. – P. 111-114.

References

1. Korzhavin, K N Vozdeystvie l'da na inzhenernye sooruzheniya / K. N. Korzhavin // Novosibirsk: Izd-vo SO AN SSSR, 1962. – 224 s. [in Russ.].
2. Koren'kov, V A Naturnye izmereniya dinamicheskogo davleniya l'da na bychok nizkonapornoy plotiny / V. A. Koren'kov // Tr. koord. soveshchaniy po gidrotekhnikе. Vyp. 111. – Leningrad : Energiya, 1975. – S. 148–152. [in Russ.].
3. Nevel, D E Ice forces on vertical piles / D. E. Nevel, R. E. Perham, G. B. Hogue // CRREL report. No. 77, 1977. – 10 p.
4. Schwartz J. The of floating ice-fields on piles// Proc. IAHR Ice Symp., Hanover, USA. 1975. Pp.373-386.

5. Bergdahl, L Two lighthouses damaged by ice / L. Bergdahl // Proc. IAHR Symposium on Ice and Its Action on Hydraulic Structures. Leningrad. 1972. – P. 234-238.
6. Hou, J Structural Design for the Ice-Resistant Platform / J. Hou, W. Shao // Proc. 24th Int. Ocean and Polar Engg Conference (ISOPE). Busan, 2014. – P. 1118-1124..
7. Jordaan, I Re-evaluation of ice loads and pressures measured in 1986 on the Molikpaq structure / I.J. Jordaan, J. Bruce, K. Hewitt, R. Frederking // In: Proc. 21st Int. Port and Ocean Eng. under Arctic Condi. Conf. (POAC'11), Montréal, Canada, 2011. P.12.
8. Belendir, E N Scientific substantiation of the design of gravity support blocks of marine ice-resistant platforms and their interface with the ground base: the author's abstract. dis. ... Dr. techn. sciences. SPb.: VNIIG, 2006. 45 p. [in Russ.].
9. Vershinin SA, Truskov PA, Kuzmechev K.V. The impact of ice on the structures of the Sakhalin shelf. Moscow, Giprostroymost Institute, 2006, 208 p.
10. GOST 27751-2014. Reliability for constructions and foundations. General principles. Code of Regulations, Moscow: Standartinform, 2015, 14 p. [in Russ.].
11. Nikiforovsky, V S and Shemyakin, E I Dinamicheskoe razrushenie tverdykh tel, (Dynamic Destruction of Solids), Novosibirsk: Nauka, 1979, 271 p. [in Russ.].
12. SP 38.13330.2019. Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and ships). Code of Regulations, updated version of SNiP 2.06.04-82*. [in Russ.]. 2019..
13. Solomatn, V I Structural mechanisms of ice deformation, Reports of the Academy of Sciences. 2017. vol. 477, No. 4, pp. 475-479.. [in Russ.].
14. Kuzmenko, V A A new schemes of deformation of solid bodies, Kiev: Naukova Dumka, 1973, 200 P. (in Russ.).
15. G. Si and G. Libovits, "Mathematical theory of brittle fracture," in: Fracture [in Russian], Vol. 2 (ed. G. Libovits), Moscow (1975), pp. 83–203. Ya. S. Uflyand, Integral Transformations in Problems of Elasticity Theory [in Russ.], Nauka, Leningrad (1967).
16. Zhurkov, S N, Kuksenko, V S, Petrov, V A Physical basis of the prediction of mechanical failure. Reports of the Academy of Sciences. 1981;(259)6:1350-1353. [in Russ.]. [Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A. Fizicheskie osnovy prognozirovaniya mekhanicheskogo razrusheniya // Doklady Akademii nauk. 1981. T. 259, № 6. S. 1350-1353].
17. Shtyrev, N A Structural-energy kinetic theory of the strength of a solid medium (Deformation and destruction of solids from the standpoint of kinetic structural-energy theory) / N.A. Shtyrev // Fifth International STC "Turbo-2014", Kiev, Pisarenko Research Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2014, 55 p. [in Russ.].
18. Cherepanov, G P Mechanics of brittle fracture. Moscow: Nauka, 1974. – pp. 486-494. [in Russ.].
19. Fedorov, V V Thermodynamic aspects of strength and fracture of solids. Tashkent: Fan, 1979. – 168 p. [in Russ.].
20. Meshkov, Yu Ya The concept of critical energy density in models of destruction of solids. In Advances in Metal Physics (G. V. Kurdymov Inst. of Metallophysics of the Nat. Acad. of Sciences of Ukraine). Vol. 2. Kiev, 2001. pp. 7-50. [in Russ.].
21. Khrapaty, N G, Tsuprik V G Semi-natural studies of the dynamic effect of ice on the supports of hydraulic structures Ice-thermal phenomena and their accounting during the construction and operation of hydraulic units and hydraulic structures. In Proc. of Conf. and Meetings on Hydraulic Eng.. – Leningrad: Energiya, 1979. – pp. 101-104. [in Russ.].
22. Croasdale, K. R. Indentation tests to investigate ice pressures on vertical piers / K. R. Croasdale, N. R. Morgenstern, J. B. Nuttall // J. Glaciology, 19(81), 1977. – P. 309-312.
23. Taylor T.P. An experimental investigation of the crushing strength of ice// Proc. POAC Conf., Quebec, 1981, pp.332-345.
24. Hirayama, K. Ice forces on vertical piles / K. Hirayama, J. Schwarz, H. C. Wu // Proc. IAHR Ice Symposium. Hanover, USA. 1975. – P. 429-441.
25. Voytkovsky, K F Mechanical properties of ice. Moscow: Publ. House of the USSR Acad. of Sci. 1960. – 100 p. [In Russ.].
26. Jordaan, I. J. Mechanics of ice-structure interaction //I/J/ Jordaan // Eng/ Fracture Mechanics, 2001, 68. P. 1923-1960.
27. Zaretsky, Yu K, Chumichev, B D, Shchegolev A G Viscoplasticity of ice and frozen soils. Novosibirsk: Nauka, SB RAS, 1985. – 185 p. [in Russ.].
28. Tsuprik, V G, Experimental Researching of the Specific Energy Mechanical Fracture of Ice by Method of Uniaxial Compression of Samples (V. G. Tsuprik, A. T. Bekker, E. E. Pomnikov et al.) Proc. 24rd Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), Busan, Korea. 2017, P. 111-114.

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

Владимир Григорьевич Цуприк, доктор технических наук, доцент, профессор департамента морских арктических технологий Политехнического института Дальневосточного федерального университета, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: tsuprik.vg@dvfu.ru

Vladimir G. Tsuprik, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Professor of the Department of Marine Arctic Technology, Polytechnical institute of Far Eastern Federal University, 690922, FEFU Campus 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok Russia, e-mail: tsuprik.vg@dvfu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.06.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 05.08.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 15.08.2023.

Научная статья

УДК 629.365

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.054>

Анализ гидродинамики взаимодействия структурных элементов полностью погруженных шнеков тандемной конструкции роторно-винтовых снегоболотоходов с водой

С.А. Карасева¹ geliosveta@gmail.com, А.В. Папунин¹ lexa-lenia@rambler.ru,

В.В. Беляков¹ belyakov@nntu.ru, В.С. Макаров¹ makvl2010@gmail.com,

Д.Ю. Малахов² malahow_dm@mail.ru, А.А. Ключкин¹ aak-nntu@yandex.ru

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

²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет

Аннотация: В статье рассматривается сравнительный структурный анализ работы в водной среде отдельных структурных элементов роторно-винтовых движителей снегоболотоходных амфибийных машин тандемной конструкции при условии полного погружения движителя в воду и сравнительная оценка вклада каждого из этих элементов в процесс создания тяги и формирования момента движителя в общем случае, а также относительная величина влияния данных элементов на общую эффективность движительной установки на основании графических зависимостей, полученных в результате моделирования. Кроме этого, дополнительно проанализированы специфические особенности гидродинамики роторно-винтовых движителей тандемной конструкции при их эксплуатации на ходовом и швартовном режимах для трех моделей шнеков с типовыми геометрическими и конструктивными параметрами, которые наиболее характерны для движителей существующих снегоболотоходных вездеходов, применяемых ранее и в настоящее время в районах с климатическими и дорожными условиями, аналогичными либо достаточно близкими к арктическим регионам, регионам Сибири и регионам Крайнего Севера.

Ключевые слова: шнек, роторно-винтовой движитель, тяга, момент, гидродинамика, снегоболотоход, эффективность, компьютерное моделирование.

Финансирование: Данная работа проведена при финансовой поддержке грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых – кандидатов наук МК-336.2022.4.

Для цитирования: Карасева С.А., Папунин А.В., Беляков В.В., Макаров В.С., Малахов Д.Ю., Ключкин А.А. Анализ гидродинамики взаимодействия структурных элементов полностью погруженных шнеков тандемной конструкции роторно-винтовых снегоболотоходов с водой. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 3, С. 132—140. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.054

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.054>

Analysis of hydrodynamics of interaction between structural elements of full-submerged tandem Archimedes screws of rotary-screw snow and swamp-going vehicles and water

Svetlana A. Karaseva¹ geliosveta@gmail.com, Aleksey V. Papunin¹ lexa-lenia@rambler.ru,

Vladimir V. Belyakov¹ belyakov@nntu.ru, Vladimir S. Makarov¹ makvl2010@gmail.com,

Dmitriy Yu. Malahov² malahow_dm@mail.ru, Anton A. Klyushkin¹ aak-nntu@yandex.ru

¹Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,

²Moscow Automobile and Road Construction State Technical University

Abstract. The paper considers a comparative structural analysis of the operation in the aquatic environment of specific structural elements of rotary-screw propulsors of snow and swamp-going amphibious vehicles of tandem design under the condition of complete immersion of the propulsor in water and a comparative assessment of the contribution of each of these elements to the process of creating thrust and forming the torque of the propulsor in the general case, as well as the relative magnitude of the influence of these elements on the overall efficiency of the propulsion unit based on graphical dependencies obtained as a result of modeling. In addition, the specific features of the hydrodynamics of tandem rotary-screw propulsors during their operation in running and mooring modes for three models of Archimedes screws with typical geometric and structural parameters are additionally analyzed, which are the most typical of the propulsors of existing snow and swamp-going all-terrain vehicles used previously and currently in areas with climatic and road conditions similar or sufficiently close to the Arctic regions, regions of Siberia and regions of the Far North.

Key words: Archimedes screw, rotary-screw propulsion unit, thrust, torque, hydrodynamics, snow and swamp-going vehicle, efficiency, computer simulation

Financial Support: The results of the given study have been obtained with financial support of the grants of the President of the Russian Federation № МК-336.2022.4.

For citation: Svetlana A. Karaseva, Aleksey V. Papunin, Vladimir V. Belyakov, Vladimir S. Makarov, Dmitriy YU. Malahov, Anton A. Klyushkin Analysis of hydrodynamics of interaction between structural elements of full-submerged

tandem Archimedes screws of rotary-screw snow and swamp-going vehicles and water. Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 3, P. 132—140. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.054

Введение

В настоящее время активное освоение газовых и нефтяных месторождений приводит к усиленному исследованию территорий Сибири, Крайнего Севера и Арктики, так как именно в этих регионах сосредоточено большое количество данных природных ресурсов. В таких климатических районах наиболее распространены опорными основаниями являются болота различных типов, илистые грунты, снег различной глубины, заснеженный и чистый лед, шуга, а также лед в воде в виде обломков разного размера (от мелкобитого до крупнобитого). Такие условия бездорожья вызывают затруднения для большей части транспортных средств; даже вездеходные амфибии зачастую не могут справиться с преодолением наиболее тяжелых участков, особенно при частом чередовании опорных оснований, а также на граничных переходах между ними [1, 2].

Для работы в подобных условиях как нельзя лучше подходят роторно-винтовые снегоболотоходные амфибии: благодаря специфике конструкции шнековых движителей, а именно, большому пятну контакта ротора с опорным основанием, они оказывают крайне низкое давление на грунт в сравнении со многими остальными типами движителей и обеспечивают высокую проходимость по опорным основаниям с низкой несущей способностью.

Однако, если сухопутные характеристики роторно-винтовых движителей (РВД) достаточно хорошо изучены, то исследований по их водоходным характеристикам на данный момент практически нет, тогда как актуальность изучения их особенностей и параметров движения на воде растет изо дня в день. Таким образом, данная статья освещает вопросы гидродинамики роторно-винтовых движителей снегоболотоходных амфибий, в частности, движителей со шнеками тандемной конструкции на ходовом и швартовном режимах. Ниже приводятся зависимости, полученные в ходе исследований.

Ранее авторами были выполнены исследования гидродинамики одиночных шнековых движителей, в результате которых были получены зависимости аналогичного характера. Результаты структурного

анализа гидродинамического взаимодействия таких шнеков с водной средой приведены в статье [3].

1. Описание численного моделирования

Для решения задач применялись методы численного моделирования при постоянных значениях скорости потока $v=4$ м/с на ходовом режиме и 0 м/с – на швартовном; значения частоты вращения движителя варьировались в диапазоне $n=200\dots600$ об/мин.

На рисунке 1 представлены схемы используемых трехзаходных моделей шнековых движителей тандемной конструкции. Геометрические характеристики всех трех моделей, за исключением углов наклона винтовой линии, идентичны и являются наиболее характерными для роторно-винтовых движителей снегоболотоходных машин [4, 5, 6]. Значения углов наклона винтовой линии составляют, соответственно, 24, 30 и 39 градусов: меньшие углы наклона соответствуют типовым значениям для тяговых машин, большие – для транспортных.

В результате численного моделирования гидродинамики моделей был получен большой объем данных.

Анализ этих данных подтверждает всю сложность гидродинамики взаимодействия шнеков тандемной конструкции с водной средой. Для возможности проведения структурного анализа весь движитель был разделен на логические элементы, а именно: передний обтекатель, задний обтекатель, входные и выходные винтовые линии, разбитые на три элемента каждая, а также цилиндрические части винтовых линий носового и кормового шнека в количестве 8 элементов – по 4 элемента на шнек (рисунок 1). На каждом из этих элементов контролировались и регистрировались осредненные значения тяги в продольном направлении и крутящего момента относительно оси вращения движителя. Кроме этого, сами базовые цилиндры обоих шнеков также были поделены на 4 элемента каждый; однако данные элементы практически не участвуют в создании тяги или сопротивления, поэтому на графиках не приведены.

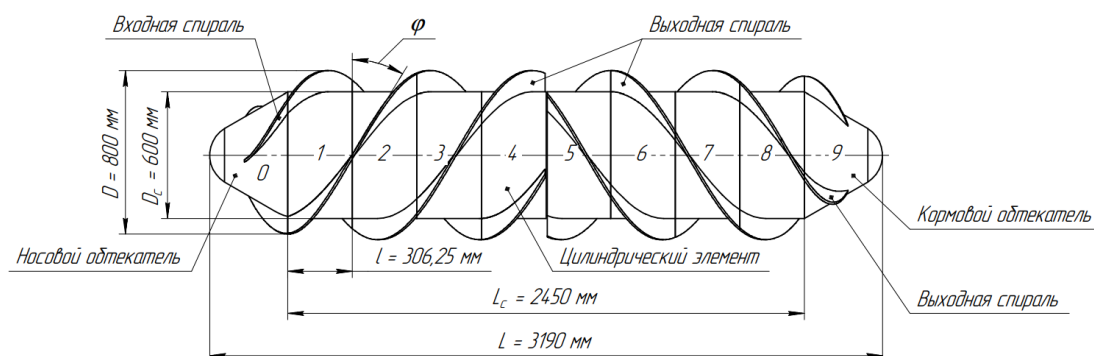
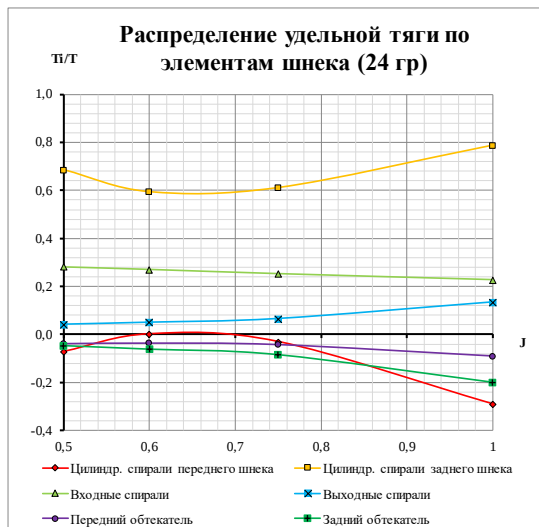


Рис. 1. Схема модели шнека тандемного роторно-винтового движителя

Ходовой режим



Швартовный режим

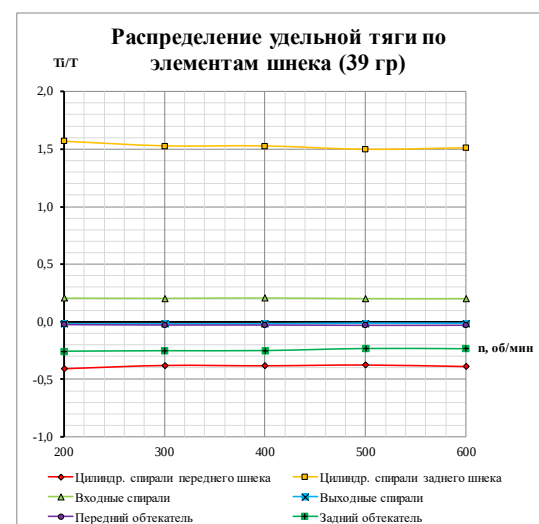
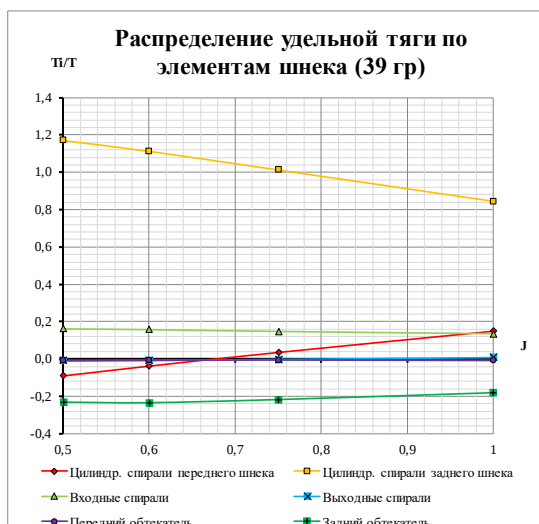
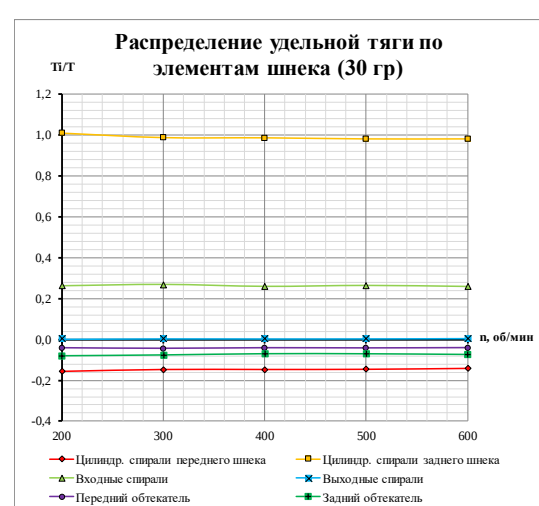
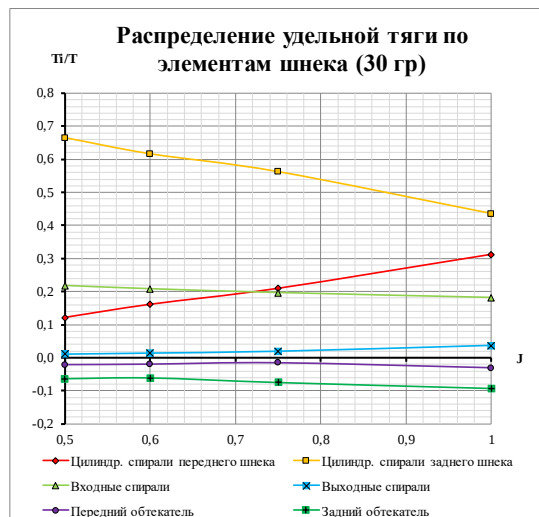
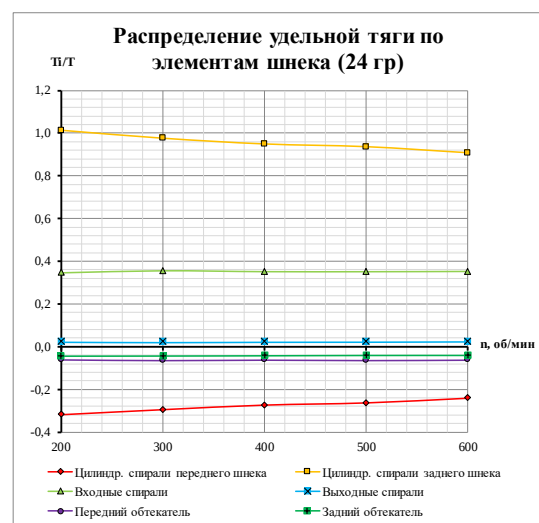
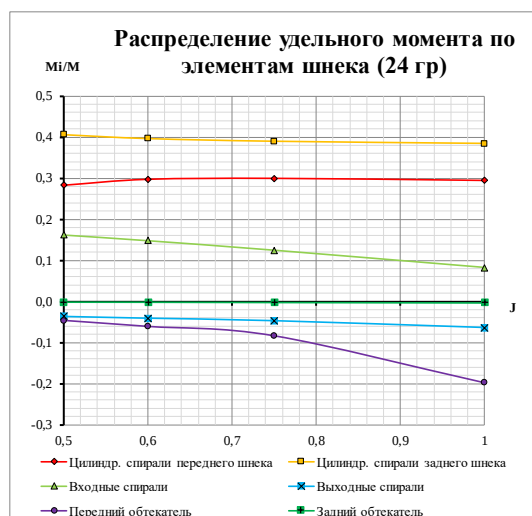


Рис. 2. Распределение удельной тяги по элементам шнекового движителя на ходовом и швартовном режимах

Ходовой режим



Швартовый режим

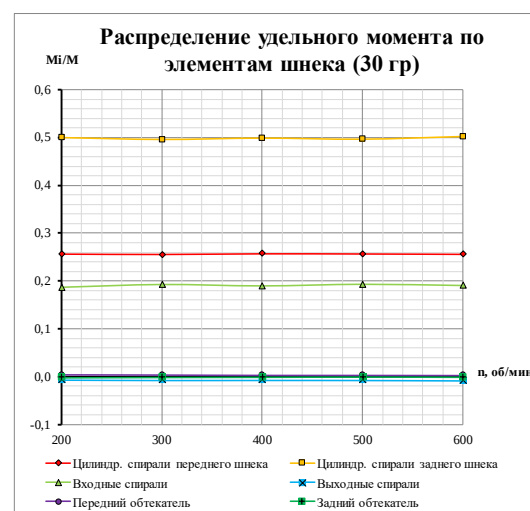
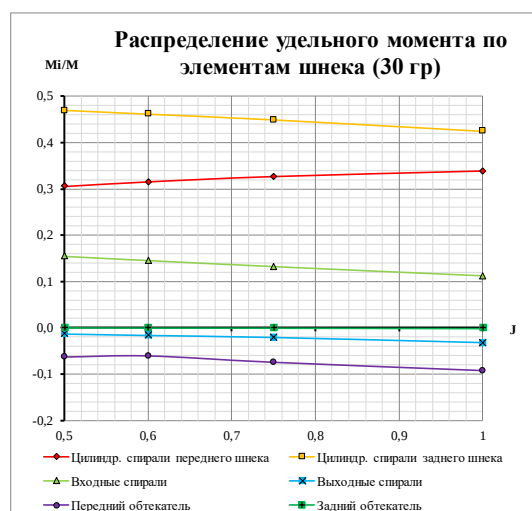
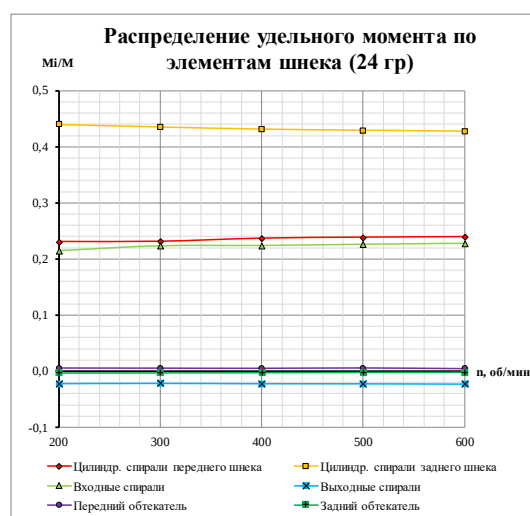
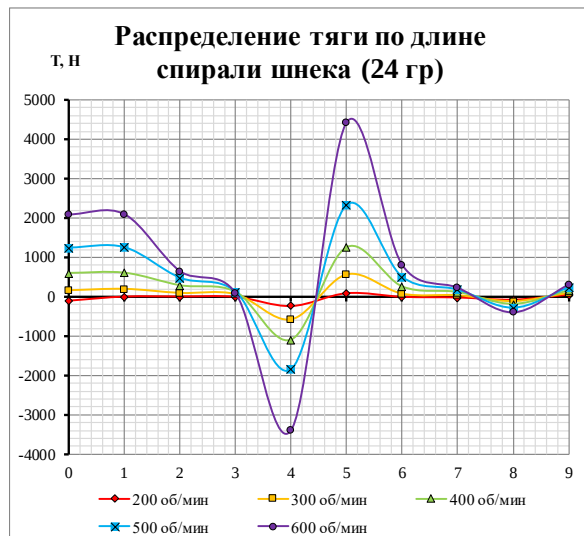


Рис. 3. Распределение удельного момента по элементам шнекового движителя на ходовом и швартовном режимах

Ходовой режим



Швартовный режим

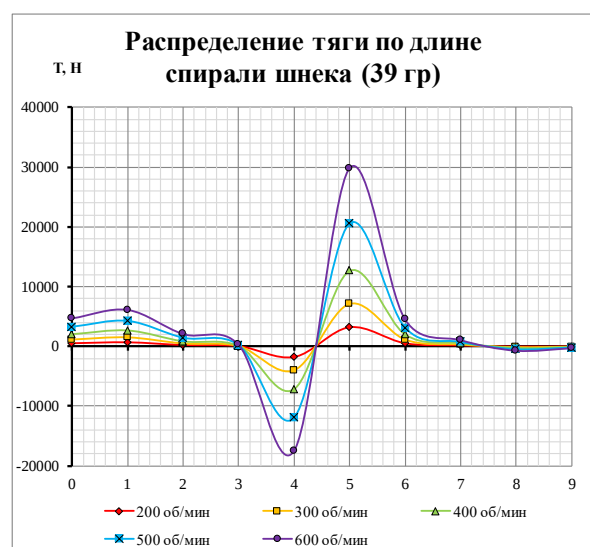
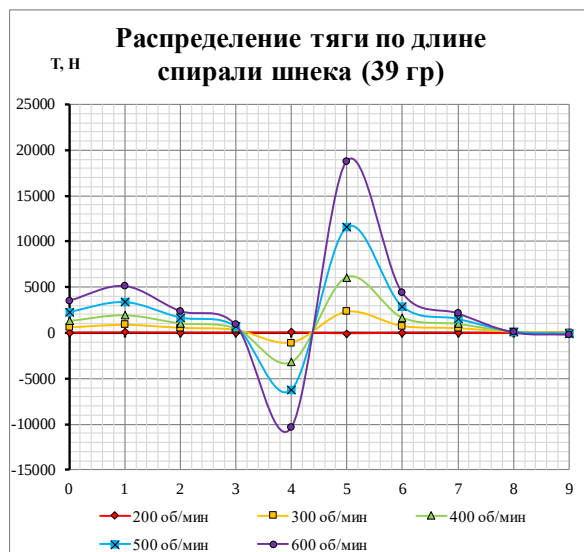
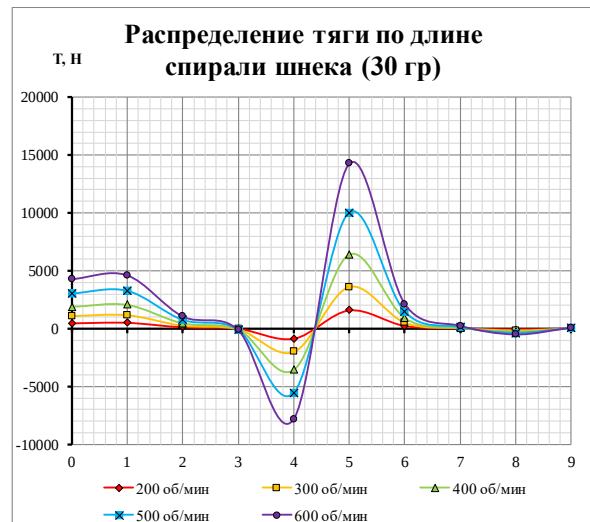
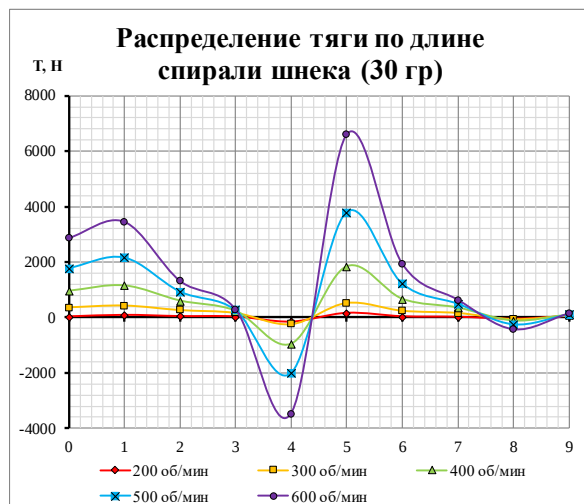
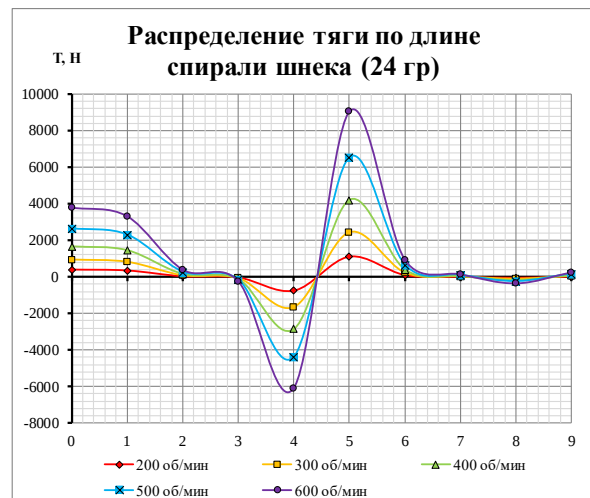
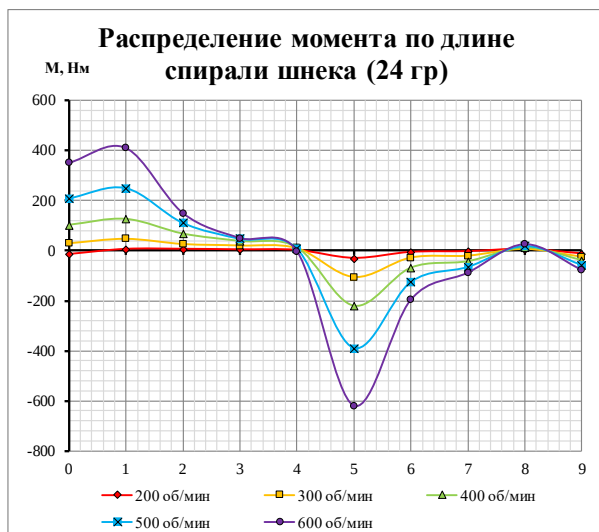


Рис. 4. Распределение тяги по длине спиральной навивки шнеков на ходовом и швартовном режиме

Ходовой режим



Швартовный режим

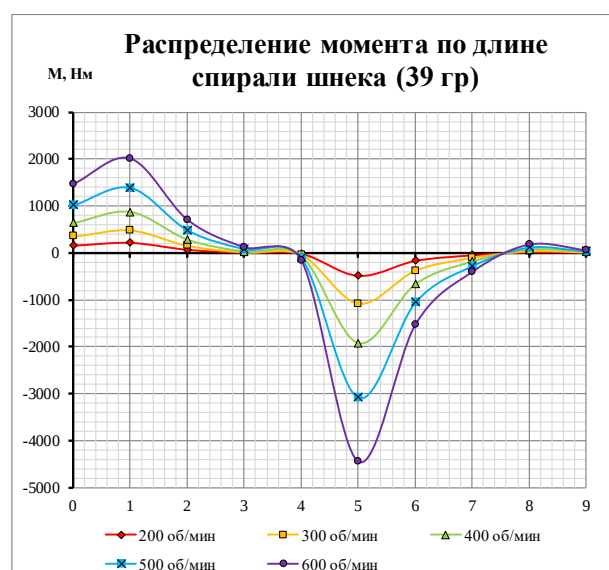
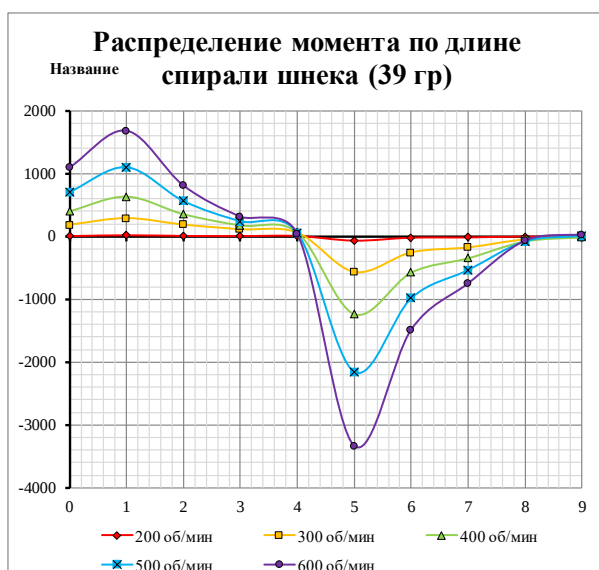
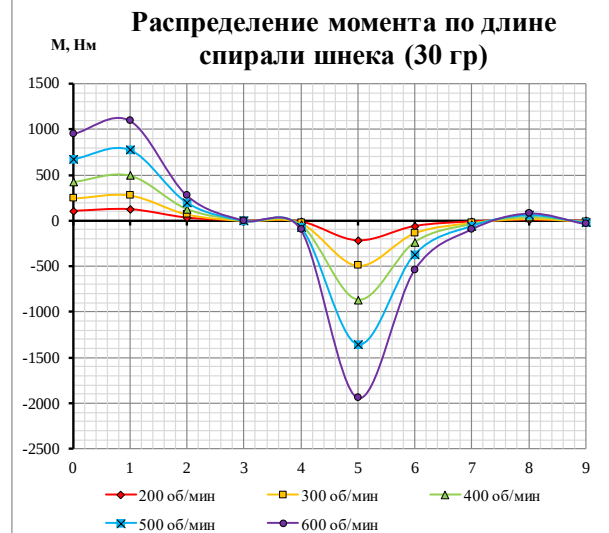
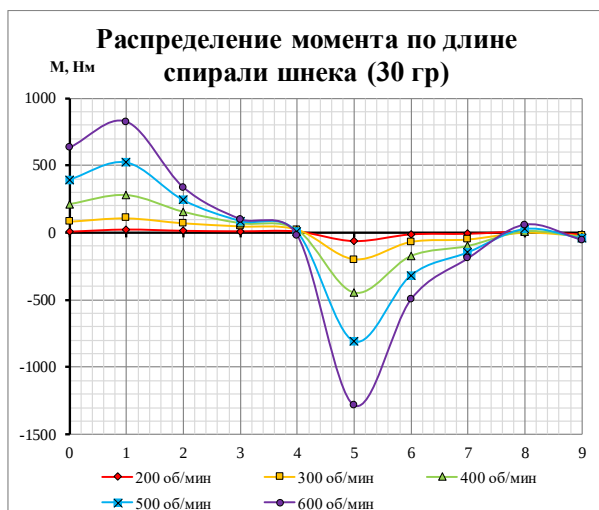
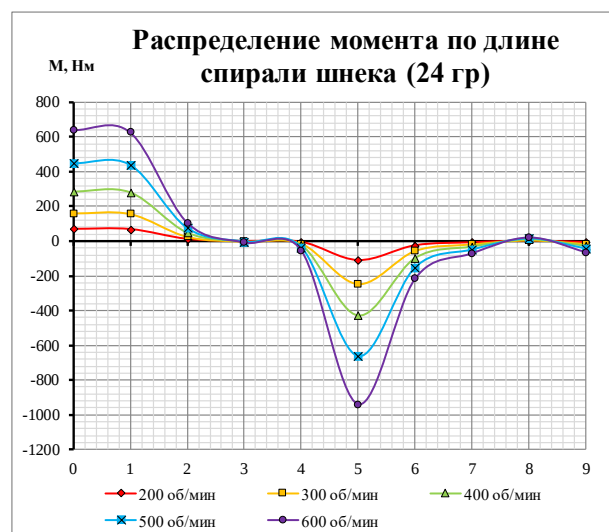


Рис. 5. Распределение момента по длине спиральной наливки шнеков на ходовом и швартовном режиме

2. Анализ поэлементного распределения удельной тяги и удельного момента

Рисунки 2 и 3 показывают кривые удельной тяги и удельного момента на основных элементах для трех моделей движителя на ходовом и швартовном режимах. Для ходового режима кривые представлены в традиционном безразмерном виде в зависимости от относительной поступи. Для швартовного режима, у которого скорость фронтально набегающего потока воды равна нулю и относительная поступь, соответственно, также равна нулю, используется несколько другой принцип, а именно, зависимость от количества оборотов на движителе.

На графиках T_i – это тяга движителя на определенном элементе, Q_i – соответствующий момент, T – общая тяга движителя, Q – общий подводимый момент, J – относительная поступь, равная

$$J = \frac{v_a}{n \cdot D},$$

где V_a – скорость потока воды (м/с), n – частота вращения движителя (об/сек), D – диаметр шнека (м) [7].

Как видно из графиков, элементы шнекового движителя могут создавать и тягу, и сопротивление, что проявляется в положительных и отрицательных значениях на графиках соответственно.

При анализе данных о параметрах движения на ходовом режиме можно заметить, что наибольший вклад в создание тяги вносят винтовые линии кормового шнека, расположенные на базовом цилиндре (рисунок 2). Кроме того, в этом процессе также довольно активно участвуют входные винтовые линии, хотя для транспортных машин, то есть для машин с движителем, у которого угол наклона винтовой линии приближается к верхней границе диапазона типовых значений, эффективность входной части винтовых линий несколько снижается, а цилиндрической части – растёт. Выходные спирали практически не участвуют в создании тяги. Наибольший вклад в создание сопротивления вносит задний обтекатель, его сопротивление меньше всего у машин со средними углами наклона винтовой линии. Помимо этого, сопротивление создает также и передний обтекатель, однако несколько меньше и не для всех моделей: для тяговых машин с малыми углами наклона винтовой линии сопротивление переднего обтекателя больше, в то время как для транспортных машин оно практически равно нулю.

Интереснее всего поведение цилиндрической части винтовых линий носового шнека, так как при малых углах наклона винтовой линии они создают сопротивление, при средних – участвуют в создании тяги наравне со входными спиралями, а при больших – создают и сопротивление, и тягу в зависимости от значения относительной поступи.

На швартовном режиме наблюдается практически идентичная картина характера кривых, за исключением поведения цилиндрической части винтовых линий носового шнека, которые для всех трех моделей создают сопротивление, причем их вклад в этот процесс наибольший в сравнении с другими элементами.

При анализе распределения удельного момента по элементам движителя на ходовом режиме можно отметить характеристическое сходство большинства кривых с кривыми тягового распределения (рисунок 3). Цилиндрическая часть винтовых линий кормового шнека вносит наибольший вклад в создание толкающего момента так же, как и в создание тяги; входные винтовые линии тоже участвуют в этом процессе. Задний обтекатель не создает ни толкающего, ни тормозящего момента, его участие минимально. Наибольший тормозной момент создает передний обтекатель; выходная часть винтовых линий также создает небольшое торможение на малых и средних углах наклона винтовой линии, однако при увеличении этого угла величина тормозного момента падает вплоть до нуля при 39° .

Одним из основных отличий от формирования тяги является тот факт, что поведение цилиндрической части винтовых линий носового шнека в данном случае является практически неизменным для всех трех исследуемых моделей. Значения удельного момента на этих элементах в 2...3 раза больше, чем на входной части винтовых линий.

При сравнении поведения элементов движителя и их участия в формировании момента на швартовном режиме можно заключить, что общая картина, как и в случае с тягой, практически идентична ходовому режиму. Единственным исключением является то, что при движении на швартах практически ни один элемент не создает тормозного момента, только для тяговых машин небольшое торможение создают выходные винтовые линии.

3. Анализ распределения тяги и момента по длине винтовой линии

Отдельный интерес представляет распределение тяги и момента по длине спиральной навивки шнекового движителя, показанное на рисунках 4 и 5. Для графического представления винтовые линии разбиты на 10 элементов, пронумерованных по порядку от носа к корме (рисунок 1). Так, значение «0» соответствует входному элементу винтовых линий, а «9» – выходному. Эти значения на графиках отложены по оси абсцисс.

При анализе картин распределения тяги на ходовом и швартовном режимах можно отметить их принципиальное сходство для всех моделей на обоих режимах. Характер кривых абсолютно одинаков по элементам винтовых линий. Наибольшее участие в создании тяги принимает передняя часть кормового шнека (элемент «5»), что, предположительно, объясняется работой в потоке, закрученным носовым шнеком в обратном направлении. Кроме того, значительный вклад вносит передняя часть шнекового движителя, а именно, входная часть винтовых линий и передняя часть носового шнека (элементы «0» и «1»). Небольшую тягу создают средние части шнеков. Наибольшее сопротивление создается задней частью носового шнека, хотя небольшой вклад в этот процесс вносит и задняя часть кормового шнека вместе с задним обтекателем. Картины идентичны и для ходового, и для швартовного режимов.

Подобный характер имеет также распределение момента (рисунок 5). Как можно видеть, наибольший вклад в создание момента также вносит передняя часть винтовых линий шнекового движителя. Средняя и задняя части носового шнека на ходовом режиме создают совсем небольшую тягу, а вот на швартовном режиме практически не участвуют в этом процессе, равно как и задняя часть кормового шнека на всех режимах.

Интересным является переход части элементов в «турбинный режим», то есть в режим работы, когда элемент создает отрицательный, тормозящий момент. Для упрощения восприятия такого режима можно условно представить картину, когда не движитель закручивает поток воды, а наоборот. Небольшой турбинный режим наблюдается на выходной части винтовых линий, однако гораздо больший тормозящий момент создается передней и средней частью кормового шнека, а если быть точнее, то почти всей его цилиндрической частью. Это можно объяснить работой в потоке воды, закрученном передним шнеком, причем, что

характерно, подобное поведение проявляется для всех рассматриваемых углов навивки на всех режимах, что позволяет довольно уверенно предположить, что такая картина будет типична и для роторов с иными параметрами.

Заключение

Исходя из анализа приведенных картин, можно сделать вывод, что полученные зависимости иллюстрируют устойчивые тенденции поведения конкретных элементов тандемных роторно-винтовых движителей снегоболотоходных машин с типовыми параметрами вне зависимости от скорости хода и количества оборотов, включая швартовный режим. С учетом устойчивости и общности характера кривых тяги и момента можно с уверенностью предположить возможность применения полученных данных для исследований гидродинамического взаимодействия тандемных шнековых движителей с водной средой и с другими параметрами геометрии шнеков и рабочей среды.

Литература

1. Карасева, С.А. Анализ текущего состояния исследованности вопросов движения снегоболотоходных машин с РВД по снежно-ледовым опорным поверхностям / С.А. Карасева, В.С. Макаров, Д.Ю. Малахов // IV Байкальская международная научная конференция – стратегическая сессия «Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли»; ИРНТУ. – Иркутск, 2022.
2. Карасева, С.А. Классификация типовых опорных поверхностей для роторно-винтовых снегоболотоходных машин / С.А. Карасева, А.В. Папунин, В.С. Макаров, Д.Ю. Малахов // Будущее технической науки: сборник материалов XXI Всероссийской молодежной научно-техн. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2022. – С. 153-155.
3. Карасева, С.А. Структурный анализ гидродинамического взаимодействия полностью погруженных шнеков роторно-винтовых движителей снегоболотоходных машин с водной средой методами численного моделирования / С.А. Карасева, А.В. Папунин, В.В. Беляков, В.С. Макаров, Д.Ю. Малахов // 15-th International Conference “Intelligent Systems” (INTELS’22).
4. Колотилин, В.Е. Статистическая модель выбора геометрических параметров, массово-инерционных и мощностных характеристик транспортно-технологических машин на роторно-винтовых движителях / В.Е. Колотилин, А.В. Михеев, П.О. Береснев [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. - 2015. - № 3 (110). - с. 156-208.
5. Куляшов, А.П. Экологичность движителей транспортно-технологических машин / А.П. Куляшов, В.Е. Колотилин - М.: Машиностроение, 1993. - 288 с.: ил
6. Введение в динамику систем заснеженная местность - роторно-винтовая машина: монография / В.А. Шапкин, У.Ш. Вахидов, И.А. Ерасов, А.А. Кошурина, Ю.И. Молев. - Н. Нивгород: НИУ РАНХиГС, 2017. - 390 с.
7. Басин, А.М. Ходкость и управляемость судов: учеб. пособие для вузов водн. трансп. / А.М. Басин - М.: Транспорт, 1977. - 456 с.

References

1. Karaseva, S.A. Analiz tekushchego sostoyaniya issledovannosti voprosov dvizheniya snegobolotohodnyh mashin s RVD po snezhno-ledovym opornym poverhnostyam [Analysis of the current state of research on the movement of snow and swamp-going vehicles with RSP on snow-and-ice support surfaces] / S.A. Karaseva, V.S. Makarov, D.YU. Malahov // IV Bajkal'skaya mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya – strategicheskaya sessiya «Snezhnyj pokrov, atmosferynye osadki, aerizoli»; IRNITU. – Irkutsk, 2022.
2. Karaseva, S.A. Klassifikaciya tipovyh opornyh poverhnostej dlya rotorno-vintovyh snegobolotohodnyh mashin [Classification of typical support surfaces for rotary-screw snow and swamp-going vehicles] / S.A. Karaseva, A.V. Papunin, V.S. Makarov, D.YU. Malahov // Budushchee tekhnicheskoy nauki: sbornik materialov XXI Vserossiyskoj molodezhnoj nauchno-tekhn. konf.; NGTU im. R.E. Alekseeva. – Nizhnij Novgorod, 2022. – S. 153-155.
3. Karaseva, S.A. Strukturnyj analiz gidrodinamicheskogo vzaimodejstviya polnost'yu pogruzhennyh shnekov rotorno-vintovyh dvizhitelej snegobolotohodnyh mashin s vodnoj sredoj metodami chislennogo modelirovaniya [Structural analysis of hydrodynamical interaction of full-submerged Archimedes screws of rotary-screw propulsion units of snow and swamp-going amphibious vehicles with water area by methods of computer simulation] / S.A. Karaseva, A.V. Papunin, V.V. Belyakov, V.S. Makarov, D.YU. Malahov // 15-th International Conference “Intelligent Systems” (INTELS’22).
4. Kolotilin, V.E. Statisticheskaya model' vybora geometricheskih parametrov, massovo-inercionnyh i moshchnostnyh harakteristik transportno-tekhnologicheskikh mashin na rotorno-vintovyh dvizhitelyah [Statistical model of the choice of geometric parameters, mass-inertia and power characteristics of transport and technological machines on rotary-

- screw propulsors] / V.E. Kolotilin, A.V. Miheev, P.O. Beresnev [i dr.] // Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva. - 2015. - № 3 (110). - s. 156-208.
5. Kulyashov, A.P. Ekologichnost' dvizhitelej transportno-tekhnologicheskikh mashin [Ecological safety of propulsion units of transport and technological vehicles] / A.P. Kulyashov, V.E. Kolotilin - M.: Mashinostroenie, 1993. - 288 s.:
 6. Vvedenie v dinamiku sistem zasnezhennaya mestnost' - rotno-vintovaya mashina: monografiya [Introduction to dynamic of systems snow-covered area – rotary-screw vehicle: monograph] / V.A. SHapkin, U.SH. Vahidov, I.A. Erasov, A.A. Koshurina, YU.I. Molev. - N. Nivogorod: NIU RANHiGS, 2017. - 390 s.
 7. Basin, A.M. Hodkost' i upravlyaemost' sudov: ucheb. posobie dlya vuzov vodn. transp. [Propulsion and course-keeping qualities of ships: study guide for higher educational establishments of water transport.] / A.M. Basin - M.: Transport, 1977. - 456 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

Светлана Алексеевна Карасева, аспирант кафедры Строительные и дорожные машины, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижегородская область, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: geliosveta@gmail.com

Svetlana A. Karaseva graduate student of department "Building and road machines", Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 603155, Minin Str., 24, Nizhny Novgorod, e-mail: geliosveta@gmail.com

Алексей Валерьевич Папунин, кандидат технических наук, профессор кафедры Строительные и дорожные машины, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижегородская область, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: normokontrol_sdm-2020@bk.ru

Alexey V. Papunin, Ph.D. (Eng), assistant professor of department "Building and road machines", Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 603155, Minin Str., 24, Nizhny Novgorod, e-mail: normokontrol_sdm-2020@bk.ru

Владимир Викторович Беляков, доктор технических наук, профессор кафедры Строительные и дорожные машины, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижегородская область, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: makvl2010@gmail.com

Vladimir V. Belyakov, Dr. Sci. (Eng), professor of department "Building and road machines", Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 603155, Minin Str., 24, Nizhny Novgorod, e-mail: makvl2010@gmail.com

Владимир Сергеевич Макаров, доктор технических наук, профессор кафедры Строительные и дорожные машины, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижегородская область, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: belyakov@nntu.ru

Vladimir S. Makarov, Dr. Sci. (Eng), professor of department "Building and road machines", Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 603155, Minin Str., 24, Nizhny Novgorod, e-mail: belyakov@nntu.ru

Дмитрий Юрьевич Малахов, кандидат технических наук, доцент кафедры Тягачей и амфибийных машин, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, 125319, Московская область, г. Москва, Ленинградский пр., 64, e-mail: malahow_dm@mail.ru

Dmitriy YU. Malahov, Ph.D. (Eng), assistant professor of department "Truck and Amphibious vehicles", 125319, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Leningradsky prospect, 64, Moscow, e-mail: malahow_dm@mail.ru

Антон Алексеевич Ключкин, студент кафедры Строительные и дорожные машины, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижегородская область, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: aak-nntu@yandex.ru

Anton A. Klyushkin student of department "Building and road machines", Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 603155, Minin Str., 24, Nizhny Novgorod, e-mail: aak-nntu@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.06.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 21.07.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 23.08.2022.

Научная статья

УДК 629.124

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.055>

Моделирование напряженно-деформированного состояния ледяного покрова

В.В. Князьков¹ vl.knyazkov@yandex.ru¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В последнее время усилилась деятельность человека в арктических и антарктических районах, а параллельно с этим возросли потребности в полном понимании процесса разрушения льда. Эти сведения имеют непосредственное применение ко многим задачам инженерной практики, и не только в полярных районах, но и в умеренных широтах применительно к зимним условиям. К числу таких задач относятся: разрушение ледяного покрова ледоколами или другими техническими средствами, устройство ледовых дорог и переправ, взлетно-посадочных полос и т.д. Многие проблемы, связанные со льдом, были решены и решаются в лабораторных условиях. Причем в последние годы доля лабораторных исследований постоянно увеличивается. Это происходит потому, что лабораторное оборудование все более и более усложняется, методика проведения экспериментов в каждой серии опытов при этом совершенствуется, а условия экспериментов поддаются более точному контролю. Однако с появлением систем автоматизированного проектирования, в состав которых включены модули для структурного анализа, стало возможным прогнозировать поведение изделий и конструкций в реальной среде путем виртуального тестирования CAD-моделей. Описанный способ моделирования напряженно-деформированного состояния ледяной пластины, разделенной трещинами, методом конечных элементов (линейный статический анализ) позволяет оценить несущую способность ледяного покрова без дорогостоящих экспериментальных исследований.

Ключевые слова: моделирование, метод конечных элементов, ледяной покров, опыты по разрушению.

Финансирование: представленные результаты получены по проекту РФФ № 22-19-00376 «Экспериментально-теоретическое исследование полуэмпирических моделей взаимодействия судов со льдом».

Для цитирования: Князьков В.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния ледяного покрова, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 3, С. 141—145. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.055

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.055>

Modeling of the stress-strain state of the ice cover

Vladimir V. Knyazkov¹ vl.knyazkov@yandex.ru¹Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev

Abstract. Recently, human activity in the Arctic and Antarctic regions has intensified, and in parallel with this, the need for a full understanding of the process of ice destruction has increased. This information is directly applicable to many tasks of engineering practice, and not only in polar regions, but also in temperate latitudes in relation to winter conditions. Such tasks include: the destruction of the ice cover by icebreakers or other technical means, the construction of ice roads and crossings, runways, etc. Many problems related to ice have been solved and are being solved in the laboratory. Moreover, in recent years, the share of laboratory research has been constantly increasing. This is because laboratory equipment is becoming more and more complicated, the method of conducting experiments in each series of experiments is being improved, and the experimental conditions are subject to more precise control. However, with the advent of computer-aided design systems, which include modules for structural analysis, it became possible to predict the behavior of products and structures in a real environment by virtual testing of CAD models. The described method of modeling the stress-strain state of an ice plate separated by cracks by the finite element method (linear static analysis) allows us to estimate the bearing capacity of the ice cover without expensive experimental studies.

Keywords: modeling, finite element method, ice cover, destruction experiments.

Financial Support: the presented results were obtained under the project of the Russian Science Foundation No. 22-19-00376 «Experimental and theoretical study of semi-empirical models of the interaction of ships with ice».

For citation: Vladimir V. Knyazkov Modeling of the stress-strain state of the ice cover, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 3, P. 141—145. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.055

Введение

В расчетах на прочность обычно предполагается, что разрушение тела происходит, как только в некоторой его точке определенная комбинация параметров σ_{ij} (нагрузка), ε_{ij} (деформация), T (температура) и t (время) достигнет критического

значения [13]. При этом разрушение тела представляют как процесс, состоящий из ряда последовательных стадий, включающих зарождение трещин, их развитие и, наконец, заключительное разделение его на отдельные части.

Несущая способность ледяного покрова водоемов изучается как специалистами по его

эксплуатации, так и специалистами по продлению навигации. Однако, в зависимости от того, является ли разрушение льда желательным или нежелательным явлением, сам факт разрушения понимается многими авторами по-разному. В одних случаях, это – достижение в ледяном покрове критических значений изгибных напряжений и появление трещин (устройство ледовых переправ [8] и аэродромов [7]), в других, – полный пролом льда, когда внешняя нагрузка компенсируется только силами плавучести обломков (проектирование ледоколов и судов ледового плавания [3]).

Проведенные опыты по пролому, например [2, 4, 5], показали, что появление сети трещин не приводит к потере несущей способности ледяного покрова. При дальнейшем нагружении и изгибе в условиях сжатия на берегах трещин возникают контактные напряжения и соответствующие им усилия распора. Эти усилия уравновешивают внешнюю нагрузку и способствуют сохранению несущей способности ледяного покрова. Поэтому при решении задач о проломе ледяного покрова, его следует рассматривать как своеобразную конструкцию, разделенную трещинами.

Таким образом, информация о способе учета трещин в ледяном покрове при решении задачи о его разрушении вертикальной нагрузкой, представляет определенный практический интерес.

1. Основные соотношения

В соответствии с классификацией П.Ф. Папковича [9] ледяной покров можно отнести к жестким пластинам, именуемым также тонкими упругими плитами. Поэтому в исследованиях прочности ледяной покровов обычно рассматривается в виде однородной изотропной упругой пластины, лежащей на упругом основании. Реакция упругого основания вычисляется с использованием гипотезы Винклера-Циммермана, предполагающей, что приходящаяся на единицу площади реакция упругого основания пропорциональна в каждой точке прогибу пластины в этой точке и не зависит от прогибов пластины в смежных точках основания. Эта гипотеза неоднократно подвергалась вполне обоснованной критике из-за неопределенности способа нахождения коэффициента упругого отпора для грунтовых оснований [11]. Однако, в случае пластин, плавающих на поверхности жидкости (т.е. ледяной покров), Винклеровское основание реализуется точно.

Дифференциальное уравнение упругой поверхности таких пластин имеет вид

$$D\nabla^2\nabla^2w + \rho_w g w = q(x, y) \quad (1)$$

В этом уравнении D – цилиндрическая жесткость пластины, w – прогиб; ρ_w – плотность воды; g – ускорение свободного падения; $q(x, y)$ – приложенная к пластине нагрузка;

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad \text{— оператор Лапласа.}$$

Подстановкой $\frac{\rho_w g}{D} = \alpha^4$ уравнение (1) приводится к

виду, более удобному для выкладок

$$\nabla^2\nabla^2w + \alpha^4w = \frac{q(x, y)}{D} \quad (2)$$

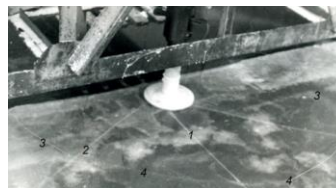
Величину $\alpha = 4\sqrt{\frac{\rho_w g}{D}}$ принято называть

характеристикой льда (параметр изгиба пластины на упругом основании), а обратная величина $r = 1/\alpha$ – характерный линейный размер при изгибе льда. Для случая сосредоточенной силы уравнение (2) становится однородным.

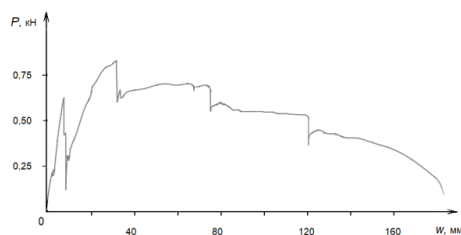
Несмотря на то, что поведение ледяного покрова при заданных внешних нагрузках описывается сравнительно простым по форме уравнением (2), его точное решение удается получить лишь при достаточно простых граничных условиях. Например, при наличии в ледяном покрове вырезов, трещин и т.п. можно получить лишь приближенное решение с помощью численных методов. Выбор численного метода во многом определяется характером решаемой задачи и в немалой степени зависит от "вкуса" исследователя. Метод конечных элементов (МКЭ) по праву занимает лидирующее положение среди численных методов [1], а в САЕ-системах в настоящее время это основной расчетный инструмент [12].

2. Опыты по разрушению ледяного покрова

Многие проблемы, связанные со льдом, были решены [4, 5] и решаются в лабораторных условиях. В результате опытов по пролому ледяных пластин вертикальной нагрузкой, например, получены диаграммы разрушения, представляющие собой зависимость приложенного усилия от прогиба $P=f(w)$. С помощью этих диаграмм можно определить основные силовые, кинематические и энергетические характеристики процесса разрушения ледяного покрова. Причем в последние годы доля лабораторных исследований увеличивается. Это происходит потому, что лабораторное оборудование постоянно усложняется, методика проведения экспериментов при этом совершенствуется, а условия экспериментов поддаются более точному контролю. На рис. 1 в качестве примера приведена одна из таких диаграмм, полученная для ледяной пластины толщиной 45 мм со свободной кромкой (схема полубесконечная пластина).



а)



б)

Рис. 4 Ледяная пластина со свободной кромкой (а) и диаграмма разрушения (б)

При разрушении пластин со свободной кромкой первой образовывалась трещина вдоль оси симметрии. Затем в каждой половине образовывалась еще одна радиальная трещина, идущая от места приложения нагрузки. Дальнейший изгиб ледяного покрова приводил к появлению кольцевых трещин и выворачиванию ледяных блоков. Момент появления трещин на диаграмме разрушения характеризуется некоторым спадом нагрузки.

3. Моделирование НДС ледяного покрова

Снизить затраты на экспериментальные исследования позволяет моделирование явлений и процессов, происходящих в элементах конструкций. Благодаря совершенствованию вычислительной техники и информационных технологий расширяется, в том числе, использование технологий численного моделирования для анализа напряженно-деформированного состояния конструкций [6].

Возможность моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) ледяного покрова рассмотрим на примере ледяной пластины, приведенной на рис. 1 (*линейный статический анализ*). Расчетная схема пластины и конечно-элементная модель (с учетом симметрии) приведены на рис. 2.

Основные допущения для линейного статического анализа: нагрузка прикладывается медленно и постепенно, пока не достигнет своей полной величины; взаимоотношения между нагрузками и вызванными реакциями предполагаются линейными (если увеличить вдвое величину нагрузки, реакция модели – перемещения и напряжения также увеличатся вдвое). Допущение линейности также можно принять, поскольку ледяной покров до момента появления первых трещин подчиняется закону Гука [10], в соответствии с которым напряжение прямо пропорционально деформации. Кроме того граничные условия не изменяются во время приложения нагрузки, которая остается постоянной по направлению и распределению.

Для пластины приняты следующие закрепления: грань, касательная к стенке бассейна зафиксирована; упругое основание гидравлического типа, нормальная жесткость которого $k = \rho_b g$; симметрия относительно грани, лежащей в плоскости YOZ (рис. 2, в, г).

Порядок образования трещин во время опыта по пролому рассматриваемой ледяной пластины на рис. 1, а обозначен цифрами. На следующих этапах расчета учитываются радиальные трещины. Чтобы исключить объединение узлов вдоль берегов трещин при создании сетки трещины моделируются в виде прорези предельно малой ширины. Как показывают результаты опытов, части ледяных пластин, разделенные трещинами, продолжают деформироваться совместно.

Очевидно, что при совместной деформации прогибы у обоих берегов трещин одинаковы, а разность углов поворота приводит к внецентренному сжатию кромок. Поэтому для граней, определяющих границы трещин, для сохранения условия совместной деформации дополнительно вводится

условие закрепления *ролик/ползун*, ограничивающий выбранную кромку от движения в направлении по нормали в плоскости к кромке. Конечно-элементная модель пластины с тремя радиальными трещинами (с учетом симметрии) приведена на рис. 3, карта прогибов ледяной пластины – на рис. 4.

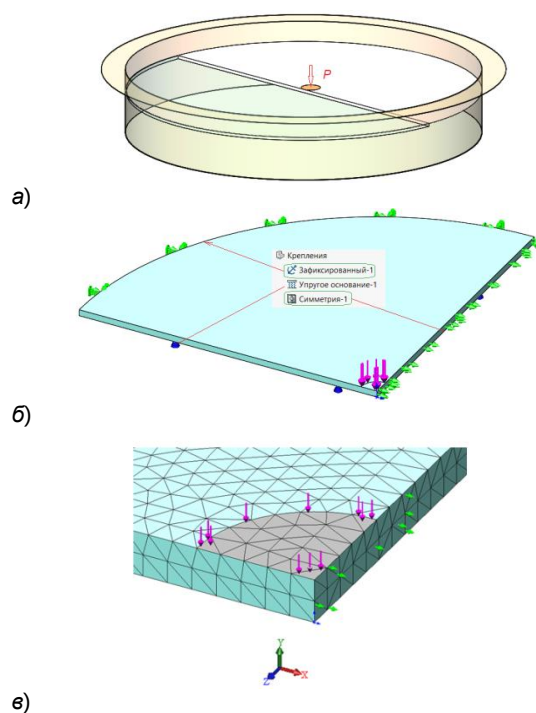


Рис. 2. Расчетная схема (а) и конечно-элементная модель пластины (б, в)

Максимальное главное напряжение σ_1 при этом возникает в вершинах трещин, что вызывает появление кольцевых трещин 3 и 4 (см. рис. 1, а). Анимационные эпюры прогибов и напряжений, где полученные результаты линейно интерполируются между несколькими кадрами, наглядно иллюстрируют поведение ледяной пластины, разделенной трещинами на сектора, под действием вертикальной нагрузки.

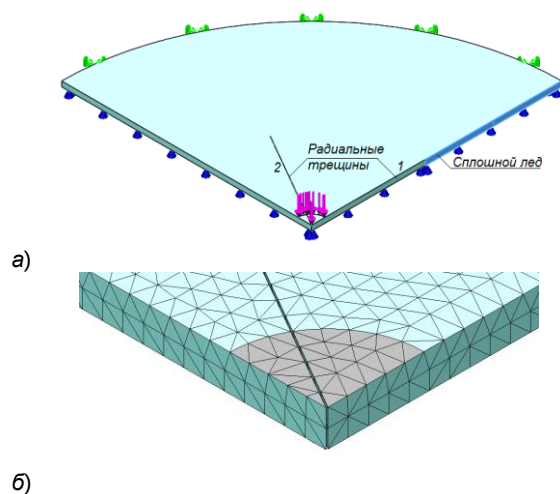


Рис. 3. Модель пластины с трещинами

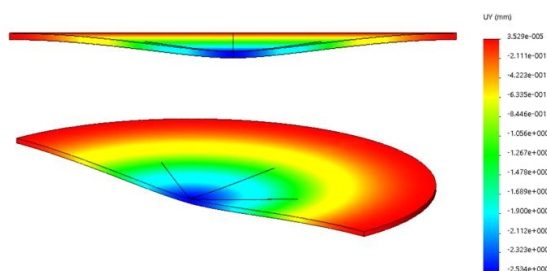


Рис. 4. Карта прогибов пластины с трещинами

Заключение

Сравнение экспериментальных значений прогибов и усилий, соответствующих моменту образования трещин с расчетными значениями, а также обработка результатов киносъемки проведенных опытов и сравнение их с анимационными эпюрами, полученными в результате расчетов, свидетельствуют о возможности моделирования НДС и поведения ледяного покрова, разделенного радиальными трещинами, с помощью метода конечных элементов.

Литература

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: пер. с англ. / под ред. Б.Е. Подбери. М.: Мир. 1975. 542 с.
2. Зуев В.А., Грамузов Е.М., Двойченко Ю.А. Экспериментальные исследования разрушения ледяного покрова // Вопросы теории, прочности проектирования судов, плавающих во льдах: Межвуз. сб., Горьков. политехн. ин-т – Горький, 1984. – С. 4-13.
3. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов / СПб: Судостроение, 2001. – 512 с.
4. Князьков В.В. Экспериментальное определение основных характеристик разрушения ледяного покрова // Морской вестник. 2008. № 4 (28). С. 106-109.
5. Князьков В.В. Влияние направления действия нагрузки на несущую способность ледяного покрова // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Вып. 51 (335). СПб., 2010. С. 13-18.
6. Князьков В.В. SolidWorks/COSMOSWorks Компьютерное моделирование и инженерный анализ методом конечных элементов: учеб. пособие / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2010. – 216 с.
7. Кубышкин Н.В., Бузин И.В., Головин Н.В., Гудошников Ю.П. и др. Ледотехнические аспекты создания объектов транспортной инфраструктуры и разведочного бурения в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018, Т. 64, № 4, С. 407-426
8. ОДН 218.010-98 Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации ледовых переправ, М.: ФДС, 1998. – 77 с.
9. Папкович П.Ф. Труды по строительной механике корабля в 4-х томах / Л.: Судпромгиз, 1962. Т. 3. - 527 с.
10. Песчанский И.С. Ледоведение и ледотехника. Л.: Морской транспорт, 1963. – 343 с.
11. Потапов В.Д. К вопросу о расчете балок на нелокально упругом основании // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, 2014, № 4, С. 63-68.
12. Сабоннадьер Ж.-К., Ж.-Л. Кулон Метод конечных элементов и САПР: Пер.с франц. – М.: Мир, 1989. – 190 с.
13. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения / М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1974. – 640 с.

References

1. Zienkiewicz O.C. The Finite Element Method in Engineering Science. McGraw-Hill Publishing Co., London, 1971. 521 p. (Russ. ed.: Zenkevich O. Metod konechnykh elementov v tekhnike. Moscow, Mir, 1975. 542 p.).
2. Zuev V.A., Gramuzov E.M., Dvoichenko Yu.A. [Experimental studies of ice cover destruction]. Voprosy teorii, prochnosti proyektirovaniya sudov, plavayushchikh vo l'dakh: Mezhdvuz. sb., Gor'kov. politekhn. in-t – Gor'kiy, 1984. – pp. 4-13.
3. Ionov B.P., Gramuzov E.M. [Ice seaworthiness of ships]. St. Petersburg: Shipbuilding, 2001. – 512 p.
4. Knyazkov V.V. [Experimental determining of the main features of ice cover destruction]. Morskoy vestnik, 2008, no. 4 (28), pp. 106-109.
5. Knyazkov V.V. [Influence of loading directions on the bearing capacity of ice cover]. Trudy TsNII im. akad. A.N. Krylova. Iss. 51 (335). St. Petersburg, 2010, pp. 13-18.
6. Knyazkov V.V. [SolidWorks/COSMOSWorks Computer modeling and engineering analysis by the finite element method: textbook. Manual]. NSTU named after R.E. Alekseev. – N. Novgorod, 2010. – 216 p.
7. Kubyshekin N.V., Buzin I.V., Golovin N.V., Gudoshnikov Yu.P., Zamarin G.A., Skutin A.A. Aspects of ice engineering for the aims of construction of the transport infrastructure and reconnaissance drilling in the Arctic. Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 4: 407–426. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-407-426
8. ODN 218.010-98 [Instructions for the design, construction and operation of ice crossings]. Moscow: FDS, 1998. – 77 p.
9. Papkovich P.F. Trudy po stroitel'noy mekhanike korablya. V 4 t. T. 3 [Proceedings of construction mechanics of ship. In 4 vols. Vol. 3]. Leningrad, Sudpromgiz, 1962. 527 p.
10. Peschanskiy I.S. Ledovedenie i ledotekhnika [Glaciology and ice technique]. Leningrad, Morskoy transport, 1963. 343 p.
11. Potapov V.D. [On the issue of calculating beams on a nonlocally elastic base]. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy, 2014, No. 4, pp. 63-68.
12. Sabonnadier J.-K., J.-L. Coulomb [Finite element method and CAD]: Trans. from French - M.: Mir, 1989. – 190 p.
13. Cherepanov G.P. [Mechanics of brittle destruction]. M.: Nauka. The main edition of the physical and mathematical literature, 1974. – 640 p.

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

Владимир Вячеславович Князьков, 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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 09.08.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.08.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 27.08.2023.



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

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.

Стоимость публикации 14400 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, основанных 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**