

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

11010010010010001010101010101010000110111000110010010010110011001100010 ISSN 2073-7173 (print)

0010100100101011110100110100100010111001001110010101001100100110001100 ISSN 2588-0233 (on line)

10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110

00101001011001100100110010011101100111000100110010010101000011100110010011100010110100100100

0011010100110100100001011010010101000100100001111100110011001101101011001110000001110010100101

1101110011001010111100101010010100110100111000101100101001100101111001010111100101101001010

0000111010100111100010101100100011100110110100100110110110011001010100111

11001100011100100110001010010100111101010101000001010100011010111001100

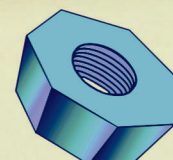
00101001110011010011110001010010101110101001000010110001100110010101100

№ 1 Часть 1 2026

№ 1 Part 1 2026



Morskie intelektual'nye tehnologii





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

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 1 часть 1 2026 Сквозной номер 71

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

О НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

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

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

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

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

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

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

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

Рубрики журнала

(соответствуют специальностям научных работников номенклатуры ВАК 2022)

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

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

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

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

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

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

Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

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

Редакционная этика журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ».

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

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

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

Стоимость бумажного номера журнала без доставки 3850 рублей.

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова

© ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ», 2026



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

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 1 part 1 2026 www.morintex.ru
Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

ABOUT SCIENTIFIC JOURNAL «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Frequency of publication - 4 issues per year.

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

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

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

Journal headings:

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

The journal is coming since 2008

Publication frequency — 4 issues per year

The journal is included into the system of Russian Science Citation Index [u](http://www.rsci.ru) and into international abstract database Web of Science (Emerging Sources Citation Index (ESCI)). Manuscripts are to be submitted to the editorial office in electronic form (E-mail: mit-journal@mail.ru)

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

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

Member of Association of science editors and publishers.

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

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

e-mail: mit-journal@mail.ru

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

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

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

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

Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Design: Anlrei V. Antonov

Page-proofs: Anna I. Solomonova

© RESEARCH CENTRE «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES» Ltd, 2026



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

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

www.morintex.ru

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

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

Редакционная коллегия **Заместители главного редактора**

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

Редакционный Совет **Сопредседатели**

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

Члены Редколлегии

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

Члены Совета

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



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

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor

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

Editorial Staff Deputy Chief Editors

Dmitriy A. Skorokhodov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia
Sergey N. Ryumin, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

Members of Editorial Staff

Viktor G Bugaev, Dr.Sci.(Eng), Professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
Evgeny P. Burakovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Professor, branch of Naval Academy, Kaliningrad, Russia
Iurii A. Vlasov, PhD (Phys & Math)
Mikhail V. Voiloshnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi, Vladivostok, Russia
Ivan I. Kostylev, Dr.Sci. (Eng), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russian Federation
Vadim V. Rodionov, PhD (Eng.), Senior Research Scientist, Sea Project, St. Petersburg, Russia
Viktoriiia IU. Semenova, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia
Nikolai A Taranukha, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia
Iurii S. Fedosenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia.
Evgeny V. Khekert, Dr. Sci. (Eng), Professor, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 9 Novorossiysk, Russia.

Editorial Board Co-chairmen

Gleb A Turichin, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia
Sergey I. Kondratyev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russia

Council Members

Evgeniy G. Burmistrov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovation Activities, Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod
Aleksandr V. Kirichenko, Dr. Sci. (Eng), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
Igor G. Malygin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, CEO, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia
Georgii N Muru, PhD (Eng.), CEO, 51 CCIS, St. Petersburg, Russia
Sergei A Ogai, Dr. Sci. (Eng.), Associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi, Vladivostok, Russia
Odd M. Faltinsen, Professor, Norwegian University of Science and Technology, Norway
Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland
Valerii N. Polovinkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Science principal, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia
Kirill V. Rozhdestvenskij, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector for International Science & Education, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

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

- **Скороходов Дмитрий Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук
- **Никитин Николай Васильевич**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Рюмин Сергей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Таранцев Александр Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук
- **Огай Сергей Алексеевич**, доктор технических наук, доцент, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
- **Герке Андрей Романович**, кандидат технических наук, доцент, Казанский научно-исследовательского технологический университет
- **Клюбина Ксения Александровна**, кандидат физико-математических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Февральских Андрей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»
- **Скоморовский Станислав Альбинович**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Павликов Сергей Николаевич**, кандидат технических наук, профессор, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
- **Егоров Станислав Борисович**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Федоров Сергей Васильевич**, доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет
- **Дерябин Виктор Владимирович**: доктор технических наук, доцент, ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова
- **Скороход Борис Аркадьевич**, доктор технических наук, профессор, Севастопольский государственный университет
- **Дюк Вячеслав Анатольевич**, д.т.н., профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук
- **Козин Виктор Михайлович**, доктор технических наук, профессор, Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук
- **Герман Галина Валентиновна**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Самаров Евгений Кимович**, доктор технических наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

- **Манухин Вадим Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Бурмистров Евгений Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Искандеров Юрий Марсович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский Федеральный Исследовательский Центр Российской академии наук
- **Пятакович Валерий Александрович**, доктор технических наук, доцент, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова
- **Сазонов Кирилл Евгеньевич**, доктор технических наук, Крыловский государственный научный центр
- **Овчинников Кирилл Дмитриевич**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

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

- **Dmitriy A. Skorohodov**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Nikolai V. Nikitin**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Saint-Petersburg State Marine Technical University
- **Sergey N. Ryumin**, Ph.D. (Eng), Assistant Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Alexander A. Tarantsev**, Dr.Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Sergei A. Ogai**, Dr.Sci. (Eng), associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi
- **Andrew R. Gerke**, Ph.D. (Eng), Assistant Professor, Kazan National Research Technological University
- **Ksenia A. Klubina**, Ph.D. (Phys & Math.), assistant professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Andrew V. Feuwral'skikh**, Ph.D. (Eng), Assistant Professor, r, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
- **Stanislav A. Skomorovskii**, Ph.D. (Eng), associate professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Sergej N. Pavlikov**, Ph.D. (Eng), professor, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University
- **Stanislav B. Egorov**, Ph.D. (Eng), Assistant Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Sergey V. Fedorov**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Kaliningrad State Technical University
- **Viktor V. Deriabin**, Dr.Sci. (Eng), associate professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Boris A. Skorohod**, Dr.Sci. (Eng), professor, professor of the Department of informatics and control in technical systems, Sevastopol State University
- **Vyacheslav A. Dyuk**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Viktor M. Kozin**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
- **Galina V. German**, Dr.Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Eugene K. Samarov**, Dr.Sci. (Eng.), Saint-Petersburg state marine technical university
- **Vadim A. Manukhin**, Ph.D. (Eng), Associate professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Evgeny G. Burmistrov**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Volga State University of Water Transport

- **Yury M. Iskanderov**, Dr.Sci. (Eng), professor, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences
- **Valeriy A. Pyatakovich**, Dr.Sci. (Eng.), assistant professor, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov
- **Kirill E. Sazonov**, Dr.Sci. (Eng), Krylov State Research Centre
- **Kirill D. Ovchinnikov**, Ph.D. (Eng), Associate professor, St. Petersburg state marine technical University

СОДЕРЖАНИЕ

стр.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

Тихонова Н.Е., Тихонов М.Ю. Автоматизированный метод расчёта геометрических характеристик формы носовой оконечности ледокола.....	13

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Родионов А.А., Рябушкин С.В. Применение бессеточных процедур для численного моделирования взаимодействия прямостенного борта судна с ледовым покровом.....	20
Козин В.М. Оценка ледовых качеств судов на воздушной подушке.....	32
Апполонов Е.М., Петров А.С., Черноморец А.Л., Юхнин А.В. Укрупненная оценка ледовых качеств при обосновании ледового класса и направления совершенствования технологий экспериментальных исследований ледовой ходкости крупнотоннажных арктических судов (КАС).....	39

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Братан С.М., Харченко А.О., Часовитина А.С., Владецкая Е.А. Повышение эффективности внутреннего шлифования цилиндров гидравлических насосов в условиях плавучих мастерских.....	53
Миклуш С.В., Алексеев А.В. Оценка эффективности и технология совершенствования управления строительством судовых заказов и судостроительного производства.....	61
Герман Г.В., Попов С.В., Иванова В.А. Параметрическое и временное прогнозирование показателей систем технического обеспечения строительства судов в обеспечение повышения эффективности судостроительного производства.....	67
Лебедева Е.Г. Медведева Е.С. Особенности развития гидроудара в двухфазном потоке.....	79
Кашина В.В., Бурмистров Е.Г. Анализ рисков, связанных с предварительным определением объемов и стоимости судоремонта.....	86

**СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)**

Володин Ю.Г., Матвеев Ю.И. Существенное ухудшение теплоотдачи в осесимметричных проточных каналах при имитации пускового режима газотурбинного двигателя.....	95
Туркин В.А., Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Инфракрасная система контроля газовых выбросов вредных веществ судовыми энергетическими установками.....	100
Корнева И.П., Кострикова Н.А. Исследование обводненности судовых моторных масел методом ЯМР-релаксометрии.....	107
Говорухин В.П., Соколов Ю.П., Ильина Н.Н., Быстрова Н.Ю. Методика количественной оценки выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух двухтопливными автомобильно-железнодорожными парами проекта CNF19M.....	114
Герасиди В.В. Моделирование структурно-функциональных аспектов цифровой эксплуатации судовых движительно-рулевых комплексов Azipod с использованием технологий Big Data.....	120
Епихин А.И., Кондратьев С.И., Хекерт Е.В. Возможности местного и удаленного мониторинга оборудования автономного судна.....	133
Дологлонян А.В., Матвеев В.Т., Клименко А.Г., Владецкая Е.А. Исследование гибких комбинированных микрогазотурбинных установок с использованием местных климатических ресурсов холода на частичных нагрузках.....	139

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Артюшенко В.М., Самаров Е.К. Определение угловых координат независимо движущихся группы объектов береговыми радиолокационными системами.....	158
Прощенко Д.Ю., Коровецкий Д.А., Чехленок А.А., Бобылев Д.С., Букин О.А. Адаптация инструментов искусственного интеллекта в программные оболочки морской робототехники в задачах обеспечения экологической безопасности морских акваторий при разливах нефтепродуктов.....	166

Костенко В.В., Михайлов Д.Н. Метод оценки влияния скорости движения АНПА на параметры его автономности.....	177
Артюшенко В.М., Самаров Е.К., Воловач В.И. Решение статистических задач по ограниченным наблюдениям с помощью принципа минимакса энтропии при обработке сигналов в корабельных радиотехнических системах.....	188
Ражев А.О., Недоступ А.А., Насенков П.В., Коновалова К.В., Сергеев Е.И., Волошин А.А. Беспроводная система управления маломерным промысловым катамараном ПК-2.....	195

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Юхимец Д.А., Губанков А.С. Метод синтеза системы группового управления беспилотными метательными аппаратами, реализующей стратегию «лидер-ведомый», на основе технологии UWB.....	205
Тимохин В.М. ИК-диагностика лазерных кристаллов, используемых в ядерных реакторах ледоколов и в морской навигации.....	214
Скороходов Д.А., Малыгин И.Г., Каминский В.Ю. Анализ обеспечения функциональной безопасности морского транспорта с учётом экологических аспектов.....	221
Дюк В.А., Каминский В.Ю. Методы машинного обучения для детектирования ботов в социальных сетях применительно к информационной безопасности водного транспорта.....	230
Бородина О.В., Шаталова Н.В. Развитие методологии системного анализа для интеллектуального управления морскими транспортными системами.....	236
Акмайкин Д.А., Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Кузнецов П.А. Планирование маршрута перехода судна с учётом ледовой обстановки.....	244
Аблязов Э.К., Аблязов К.А. Вероятностно-статистический метод оценки рисков эксплуатации устройств подъемно-транспортного оборудования.....	253
Полковникова Н.А., Полковников А.К. Анализ эволюции нейросетевых методов глубокого обучения и алгоритмов фильтрации состояний для отслеживания и прогнозирования траекторий движения морских объектов в системе поддержки принятия решений.....	261

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Скороходов Д.А., Каминский В.Ю. Алгоритм диагностики деградации и ресурсного прогнозирования для судовых экологических систем.....	276

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

Куперштейн В.И. О совершенствовании методов долгосрочного и среднесрочного планирования постройки заказов.....	283
Редькин Ю.В. Оценка эффективности технологий борьбы с помехами от устройств Wi-Fi в сетях Bluetooth LE, контролирующими состояние судового оборудования.....	292
Звягина Т.Л. Метод задания графа дискретной пространственно-временной модели оптимизации маршрута судна в дрейфующих льдах.....	301
Кадомцева А.Б., Зо Хтет Аунг, Яковлев А.Ю. Полуэмпирический метод расчета поля скорости вблизи тела вращения.....	310
Таранцев А.А., Маринов М.Л., Коновалов И.Н., Королёв О.А. О моделирования пожароопасной ситуации на судне с использованием цепей Маркова.....	320
Ткачева А.В., Абашкин Е.Е. Влияние геометрии алюмотермитной засыпки на распределение интенсивности остаточных напряжений в пластине из хладостойкой стали 20А.....	328

CONTENTS	page
DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS	
Natalia E. Tikhonova, Mikhail Yu. Tikhonov Automated method for calculating the geometric characteristics of the shape of the bow of an icebreaker.....	13
THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS	
Aleksandr A. Rodionov, Sergey V. Ryabushkin Application of meshless procedures to numerical simulate the interaction between a wall-sided ship's hull and an ice cover.....	20
Victor V. Kozin Assessment of the ice qualities of hovercrafts.....	32
Evgeniy M. Appolonov, Anatoliy S. Petrov, Andrey L. Chernomorets, Alexey V. Yukhnin High-Level Assessment of Ice Performance when Substantiating the Ice Class and Trends of Improving the Technologies to Conduct Experimental Studies of Large-Capacity Arctic Vessels' Navigation in Ice Conditions.....	39
TECHNOLOGY OF SHIP BUILDING. SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Sergey M. Bratan, Alexander O. Kharchenko, Anastasiia S. Chasovitina, Ekaterina A. Vladetskaya Improving the efficiency of internal grinding of hydraulic pump cylinders in floating workshops.....	53
Sergey V. Miklush, Anatoly V. Alekseev Evaluation of efficiency and technology for improving the management of ship orders and shipbuilding production.....	61
Galina V. German, Sergey V. Popov, Viktoriya A. Ivanova Parametric and temporary forecasting of indicators of technical maintenance systems for ship under construction to ensure an increase in the efficiency of shipbuilding production facilities.....	67
Elena G. Lebedeva, Elizaveta S. Medvedeva Features of the development of a water hammer in a two-phase flow.....	79
Vera V. Kashina, Evgeny G. Burmistrov Risk analysis related to the preliminary determination of the volume and cost of ship repair.....	86
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Yuriy G. Volodin, Yuriy I. Matveyev Significant deterioration of heat transfer in axisymmetric flow channels when simulating the starting mode of a gas turbine engine.....	95
Vladimir A. Turkin, Vadim E. Privalov, Valery G. Shemanin Infrared system for monitoring gas emissions of harmful substances from ship power plants.....	100
Irina P. Korneva, Natalia A. Kostrikova Study of water content in marine motor oils using NMR relaxometry.....	107
Valery P. Govorukhin, Yury P. Sokolov, Nataliya N. Ilina, Nataliya Yu. Bystrova Methodology for Quantitative Assessment of Atmospheric Pollutant Emissions from Dual-Fuel Road–Rail Ferries of Project CNF19M.....	114
Viktor V. Gerasidi Modeling the structural and functional aspects of digital operation of Azipod marine propulsion and steering systems using Big Data technologies.....	120
Aleksey I. Epikhin, Sergey I. Kondratiev, Evgeny V. Khekert Local and remote monitoring capabilities for autonomous vessel equipment.....	133
Andrey V. Dologlonyan, Valeriy T. Matviienko, Alexandr G. Klimenko, Ekaterina A. Vladetskaya Study of flexible combined micro gas turbine plants using local climatic cold resources at partial loads.....	139
INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS	
Vladimir M. Artyushenko, Eugene K. Samarov Determination of the angular coordinates of an independently moving group of objects by ship-based radar systems.....	158
Dmitriy Yu. Proshenko, Denis A. Korovetsky, Aleksey A. Chekhlenok, Dmitrii S. Bobylev, Oleg A. Bukin Adaptation of artificial intelligence tools into framework of marine robotics in the tasks of ensuring environmental safety of marine waters during oil spills.....	166
Vladimir V. Kostenko, Denis N. Mikhailov Method for Assessing the Impact of AUV's Speed on its Autonomy Parameters.....	177

Vladimir M. Artyushenko, Eugene K. Samarov, Vladimir I. Volovach Solving statistical problems based on limited observations using the principle of entropy minimax in signal processing in shipboard radio systems.....	188
Alexey O. Razhev, Alexander A. Nedostup, Pavel V. Nasenkov, Karina V. Konovalova, Egor I. Sergeev, Artur A. Voloshin The wireless control system for the small fishing catamaran FC-2.....	195

SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING

Dmitry A. Yukhimets, Anton S. Gubankov Group control system synthesis method for unmanned aerial vehicles for "leader-follower" strategy based on UWB technology.....	205
Viktor M. Timokhin IR-diagnostics of laser crystals used in nuclear reactors of icebreakers and in marine navigation.....	214
Dmitriy A. Skorokhodov, Igor G. Malygin, Valery Yu. Kaminsky Analysis of ensuring the functional safety of marine transport, taking into account environmental aspects.....	221
Vyacheslav A. Duke, Valery Yu. Kaminsky Machine learning methods for detecting bots in social networks in relation to information security of water transport.....	230
Olga V. Borodina, Natalia V. Shatalova Development of Systems Analysis Methodology for Intelligent Management of Marine Transportation Systems.....	236
Denis A. Akmaykin, Victor M. Grinyak, Alexander S. Devyatisilnyi, Petr A. Kusnetsov Ship route planning under ice conditions.....	244
Emil K. Ablyazov, Kemal A. Ablyazov Probabilistic and statistical method for assessing the risks of using lifting and transport equipment.....	253
Natalia A. Polkovnikova, Anatoly K. Polkovnikov Analysis of the evolution of deep learning neural network methods and state filtering algorithms for tracking and predicting maritime object trajectories in decision support system.....	261

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Dmitriy A. Skorokhodov, Valery Yu. Kaminsky The algorithm of degradation diagnostics and resource forecasting for marine ecological systems.....	276

MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Vladimir I. Kupershteyn On improvement of methods of long-term and medium-term planning of ships construction.....	283
Yuriy V. Redkin Evaluation of the technologies effectiveness to combat interference from Wi-Fi devices in Bluetooth LE networks monitoring the state of shipboard equipment.....	292
Tatiana L. Zvyagina A graph setting method for a discrete spatio-temporal model for vessel route optimization in drifting ice.....	301
Alena B. Kadomtseva, Zo Htet Aung, Aleksey Yu. Yakovlev A semi-empirical method for calculating the velocity field near a body of revolution.....	310
Alexander A. Tarantsev, Marin L. Marinov, Ivan N. Konovalov, Oleg A. Korolev On modeling a fire hazard on a ship using Markov chains.....	320
Anastasia V. Tkacheva, Evgeniy E. Abashkin Influence of aluminothermite backfill geometry on the distribution of residual stress intensity in a plate of 20A cold-resistant steel.....	328

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS

Научная статья

УДК 629.124.791

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.001>

Автоматизированный метод расчёта геометрических характеристик формы носовой оконечности ледокола

Тихонова Н.Е.¹ netikhonova@gmail.com, Тихонов М.Ю.² miktih@gmail.com

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

²ООО "Судостроительная компания Ракета"

Аннотация. В работе предложен метод автоматического расчёта геометрических характеристик формы носовой оконечности ледокола. Эти характеристики наиболее полно учитывают форму носовой оконечности судна и являются необходимыми для определения ледового сопротивления по методу Грамузова Е.М. Геометрические характеристики представляют собой интегралы по судовой поверхности. Ввиду сложности судовых обводов для их вычисления необходимо применение численного интегрирования, которое в ручном варианте довольно трудоёмко. Для расчёта поверхностных интегралов с помощью предложенного метода вся зона обледенения судна льдом автоматически разбивается на треугольники, вершинами которых служат точки на шпангоутах. Количество точек задаётся в зависимости от необходимой точности расчётов. Для подтверждения корректности метода приведён тестовый пример. Представлены результаты расчёта геометрических характеристик для ряда существующих ледоколов с помощью программы "Программа для расчёта ледового сопротивления". Геометрические характеристики можно использовать для расчёта сопротивления ледокола при разных ледовых условиях.

Ключевые слова: геометрические характеристики формы носовой оконечности, ледовое сопротивление, ледокол, сплошной лёд, численное интегрирование, поверхностные интегралы, автоматический расчёт, треугольники.

Для цитирования: Тихонова Н.Е., Тихонов М.Ю. Автоматизированный метод расчёта геометрических характеристик формы носовой оконечности ледокола, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 13—19. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.001.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.001>

Automated Method for Calculating Geometric Characteristics of the Icebreaker

Natalya E. Tikhonova¹ netikhonova@gmail.com, Mikhail Yu. Tikhonov² miktih@gmail.com

¹Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, "Shipbuilding Company "Raketa"

Abstract. The paper proposes a method for automatically calculating the geometric characteristics of the icebreaker forehead shape. These characteristics most fully take into account the shape of the vessel forehead and are necessary for determining ice resistance using the method of E.M. Gramuzov. Geometric characteristics are integrals over the vessel surface. Due to the complexity of the vessel contours, their calculation requires the use of numerical integration, which is quite labor-intensive in the manual version. To calculate surface integrals using the proposed method, the entire ice zone around the vessel is automatically divided into triangles, the vertices of which are points on the frames. The number of points is set depending on the required accuracy of calculations. A test example is given to confirm the correctness of the method. The results of calculating the geometric characteristics for a number of existing icebreakers using the program "Program for calculating ice resistance" are presented. The geometric characteristics can be used to calculate the resistance of an icebreaker under different ice conditions.

Keywords: geometric characteristics of the bow shape, ice resistance, icebreaker, solid ice, numerical integration, surface integrals, automatic calculation, triangles.

For citation: Natalya E. Tikhonova, Mikhail Yu. Tikhonov Automated method for calculating the geometric characteristics of the icebreaker bow shape, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 13—19. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.001.

Введение

При проектировании ледокола встаёт вопрос о выборе формы его носовой оконечности. Определяющим фактором при выборе формы обводов является снижение ледового сопротивления. Ледоколы проектируются в основном на работу в сплошном ледяном покрове предельной

толщины, т.е. в таком, в котором судно при работе энергетической установки на полную мощность движется с минимальной устойчивой скоростью равной приблизительно 0,5÷1,0 м/с [3,4]. Обзор методов расчета сопротивления ледокола в сплошном льду приведен в монографии [1].

Большинство приведённых методов расчета недостаточно полно учитывают форму корпуса

ледокола и вследствие этого оказываются малоприменимыми для расчета сопротивления ледоколов, имеющих полные формы корпуса, например, проект 1191, австрийский ледокол Röhthelstein и др.

Оба метода J.M.Lewis'a и R.J. Edwards'a, методы E.Enkvist'a, B.A.Зуева не учитывают, а методы ЛИВТа, D.Carter'a, G.Lindqvist'a практически не учитывают обводы ледокола при определении ледового сопротивления.

Методами М.С.Яковлева, В.А.Тренина, В.И.Каштеляна, Б.П.Ионова, наиболее полно учитывающими форму корпуса, невозможно воспользоваться для расчета сопротивления ледоколов, имеющих угол притыкания КВЛ 90°, т.к. они дают в этом случае бесконечно большое сопротивление. Хотя, как известно, речной ледокол проекта 1191 типа "Капитан Евдокимов" весьма успешно разрушает ледяной покров. Такой же угол входа КВЛ имеет австрийский ледокол Röhthelstein.

Метод В.И.Каштеляна, оба метода J.M.Lewis'a и R.J. Edwards'a, методы ЛИВТа, E.Enkvist'a, B.A.Зуева не учитывают в явном виде коэффициент трения f .

Как показывает сравнительный анализ, наиболее полно учитывает форму корпуса и физико-механические характеристики ледяного покрова метод Е.М.Грамузова [1]. Этот метод позволяет рассчитывать ледовое сопротивление для ледоколов с существенными различиями в форме корпуса. Метод цитируется по [1].

Согласно этому методу сопротивление льда движению судна R можно разделить на 4 составляющие:

$$R = R_{p_{CT}} + R_{p_v} + R_{o_{CT}} + R_{o_v}, \quad (1)$$

где $R_{p_{CT}}$, R_{p_v} – статическая и зависящая от скорости составляющие сопротивления разрушению; $R_{o_{CT}}$, R_{o_v} – аналогичные составляющие сопротивления обломков льда.

Каждую из этих составляющих можно представить в следующем виде:

$$R_i = k_i \cdot r_i, \quad (2)$$

k_i – эмпирический коэффициент; r_i – комбинация определяющих ледовое сопротивление факторов, связанная с некоторым физическим процессом, имеющая размерность силы.

Для каждой составляющей ледового сопротивления r_i определяется по следующим формулам:

$$r_{p_{CT}} = \frac{h^4}{d\alpha} \left[\frac{(1 + f_{Y_{лпф}}) + k_{сф} Y_{сф} \sqrt{\frac{\operatorname{tg} \varphi_{2ф}}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{2ф}}} \frac{d\alpha^2}{h}}{+ 0.66(1 + f_{\Phi_{лп}}) B \alpha + k_{сб} \Phi_c \frac{d\alpha^3 B}{h}} \right], \quad (3)$$

$$r_{p_v} = Fr_h \operatorname{tg} \varphi_{1ф} r_{p_{CT}}; \quad (4)$$

$$r_{o_{CT}} = (\rho - \rho_n) g h \Omega_n (\Phi_n + f \Phi_{лп}); \quad (5)$$

$$r_{o_v} = \rho_n h B v^2 \left[\left(1 + \frac{0,019}{(0,215 + Fr_h \operatorname{tg} \varphi_{1ф})} \frac{\rho}{\rho_n} \frac{1}{\alpha h} \right) \times \right. \\ \left. \times (\Phi_n + f \Phi_{лп}) \frac{1}{2} + \right. \\ \left. + 2 \frac{\rho}{\rho_n} \frac{\Omega_n}{B h} (\Phi_r + f \Phi_{лп}) \right], \quad (6)$$

где $k_{сф} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ кПа}^{-1}$, $k_{сб} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ кПа}^{-1}$; B – ширина ледокола, м; f – коэффициент трения льда о корпус судна; h – толщина льда, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; $Fr_h = \frac{v}{\sqrt{gh}}$ – число Фруда по толщине

льда; v – скорость движения, м/с; Ω_n – площадь подводной части корпуса, облегаемая льдом;

$\alpha = \sqrt[4]{\frac{\rho g}{d}}$ – параметр изгиба пластины на упругом

основании; $d = \frac{E h^3}{12(1 - \mu^2)}$ – цилиндрическая жёсткость

ледяной пластины; E, μ – модуль деформации и коэффициент Пуассона льда; $\varphi_{1ф}$, $\varphi_{2ф}$, $\varphi_{3ф}$ – углы наклона батокса к горизонту, ватерлинии к диаметральной плоскости и шпангоута к вертикали на форштевне в районе конструктивной ватерлинии.

Геометрические характеристики формы носовой оконечности ледокола:

$$\Phi_n = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} n_x^2 dy; \quad \Phi_{лп} = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} n_x \sqrt{1 - n_x^2} dy; \\ Y_{лпф} = \sqrt{\frac{1}{n_{хф}^2} + \frac{1}{n_{зф}^2}}; \quad Y_{сф} = \sqrt{\frac{1}{n_{зф}^2} - 1}; \\ \Phi_{лп} = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} \sqrt{\frac{1}{n_x^2} + \frac{1}{n_z^2}} dy; \quad \Phi_c = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} \sqrt{\frac{1}{n_z^2} - 1} dy; \quad (7) \\ \Phi_n = \frac{1}{\Omega_n} \int_{\Omega_n} n_z n_x d\Omega; \quad \Phi_{лп} = \frac{1}{\Omega_n} \int_{\Omega_n} n_z \sqrt{1 - n_x^2} d\Omega; \\ \Phi_r = \frac{1}{\Omega_n} \int_{\Omega_n} n_x^3 d\Omega; \quad \Phi_{лп} = \frac{1}{\Omega_n} \int_{\Omega_n} n_x^2 \sqrt{1 - n_x^2} d\Omega; \\ n_x = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_2 + \operatorname{tg}^2 \varphi_3}}; \quad n_z = \frac{\operatorname{tg} \varphi_3}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_2 + \operatorname{tg}^2 \varphi_3}};$$

где n_x , n_z – направляющие косинусы нормали к судовой поверхности и координатных осей для произвольной точки поверхности; $n_{хф}$, $n_{зф}$ – направляющие косинусы нормали на форштевне в районе конструктивной ватерлинии; φ_2 , φ_3 – углы наклона ватерлинии к диаметральной плоскости и шпангоута к вертикали в некоторой точке судовой поверхности; $k_{p_{CT}} = 1,3 \cdot 10^6 \text{ кПа}^2$; $k_{p_v} = 4,7 \cdot 10^6 \text{ кПа}^2$;

$k_{o_{CT}} = 2,7$; $k_{o_v} = 0,88$.

Геометрические характеристики позволяют учесть обводы корпуса ледокола при расчёте ледового сопротивления и являются одинаковыми у геометрически подобных судов. Они представляют собой интегралы по судовой поверхности, по конструктивной ватерлинии и по оси Оу (7). Их расчет вызывает определенные трудности, которые преодолеваются с помощью предлагаемого метода.

1. Метод расчёта геометрических характеристик

Геометрические характеристики могут быть сведены к следующему принципиальному виду:

$$\Phi_i = 2/B \int_0^{B/2} f_i(n_x, n_z) dy;$$

$$\Phi_j = 2/B \int_{L_{\text{сб}}} f_j(n_x, n_z) dy;$$

$$\Phi_k = 1/\Omega_n \int_{\Omega_n} f_k(n_x, n_z) dy$$

Во всех характеристиках присутствуют косинусы углов между нормалью к судовой поверхности и координатными осями (направляющие косинусы) n_x и n_z . Введена подвижная, связанная с судном система координат $Oxyz$, начало которой расположено в точке пересечения плоскостей: основной, диаметральной и мидель-шпангоута. Ось Ox направлена в нос, Oy – перпендикулярна диаметральной плоскости и направлена на правый борт, Oz – вертикально вниз.

Ввиду сложности судовых обводов для вычисления геометрических характеристик Φ_i , Φ_j и Φ_k необходимо применение численного интегрирования, которое в ручном варианте довольно трудоёмко.

Для автоматического расчёта геометрических характеристик предлагается наглядный и удобный метод, который заключается в следующем.

Для расчёта поверхностных интегралов вся зона облегания судна льдом автоматически разбивается на треугольники, вершинами которых служат точки на шпангоутах. На каждом шпангоуте точки равноотстоят друг от друга. Количество точек задаётся в зависимости от необходимой точности расчётов.

Верхняя граница зоны облегания судна льдом совпадает с КВЛ, а нижняя получается путём откладывания по периметру каждого шпангоута координаты у КВЛ в точке её пересечения данным шпангоутом. Зона облегания простирается от нулевого шпангоута до конца цилиндрической вставки.

Треугольники используются для вычисления нормали в любой точке судовой поверхности. Каждый треугольник приближённо представляет собой плоскость, параллельную плоскости, касательной к судовой поверхности. Уравнение плоскости можно записать в следующем виде:

$$Ax + By + Cz + D = 0. \quad (8)$$

Коэффициенты плоскости A , B , C , D находятся по координатам вершин треугольника - (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , (x_3, y_3, z_3) .

$$\begin{aligned} A &= y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) + y_3(z_1 - z_2); \\ B &= z_1(x_2 - x_3) + z_2(x_3 - x_1) + z_3(x_1 - x_2); \\ C &= x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2); \\ D &= x_1(y_3z_2 - y_2z_3) + y_1(x_2z_3 - x_3z_2) + \\ &+ z_1(x_3y_2 - x_2y_3) \end{aligned} \quad (9)$$

Косинусы углов между нормалью к плоскости и координатными осями определяются с помощью следующих выражений:

$$n_x = \frac{A}{K}; \quad n_y = \frac{B}{K}; \quad n_z = \frac{C}{K}, \quad (10)$$

где $K = \pm \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$, знак K противоположен

знаку D .

Площадь треугольника рассчитывается по формуле:

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}; \quad p = (a+b+c)/2, \quad (11)$$

где a , b , c – стороны треугольника, вычисляемые с помощью координат его вершин.

Интеграл по поверхности корпуса судна вычисляется следующим образом. Для каждого треугольника рассчитывается значение подынтегральной функции, затем это значение умножается на площадь треугольника. Чтобы найти значение интеграла суммируются вычисленные таким образом произведения для всех треугольников, лежащих внутри зоны облегания судна льдом.

Для вычисления интегралов по оси Oy и по КВЛ конструктивная ватерлиния разбивается шпангоутами на мелкие отрезки. Направляющие косинусы ищутся в точках, лежащих посередине таких отрезков.

Направляющие косинусы для точек, лежащих на КВЛ, вычисляются по следующим формулам:

$$n_x = \frac{\text{tg } \varphi_2}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi_2 + \text{tg}^2 \varphi_3}}; \quad n_z = \frac{\text{tg } \varphi_3}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi_2 + \text{tg}^2 \varphi_3}}, \quad (12)$$

где φ_2 и φ_3 – углы наклона КВЛ к ДП и шпангоута к вертикали соответственно в рассматриваемой точке судовой поверхности.

Угол φ_2 находится из прямоугольного треугольника, две вершины которого расположены по концам рассматриваемого отрезка КВЛ. Эти точки принадлежат соседним шпангоутам. Угол φ_3 в середине отрезка ищется как среднее арифметическое между углами на концах отрезка. Последние находятся из прямоугольных треугольников. Двумя вершинами каждого такого треугольника являются точки на шпангоутах, одна из которых принадлежит КВЛ, а другая расположена немного ниже КВЛ.

Интеграл по оси Oy рассчитывается следующим образом. Для каждого отрезка КВЛ вычисляется значение подынтегральной функции в точке посередине отрезка, которое затем умножается на проекцию данного отрезка на ось Oy . Для получения значения интеграла все полученные таким образом произведения суммируются. Нижний предел интегрирования равняется нулю, а верхний – ширине судна по КВЛ, интегрирование осуществляется только по носовой оконечности судна.

Интеграл по конструктивной ватерлинии рассчитывается аналогично интегралу по оси Oy . Отличие заключается в том, что значение подынтегральной функции умножается на длину отрезка КВЛ, а не на его проекцию.

Разбиение на треугольники используется также для вычисления площади зоны облегания судна льдом и смоченной поверхности корпуса судна, для чего суммируются площади треугольников, лежащих внутри соответствующей зоны.

Для того чтобы показать, что описанный способ вычисления поверхностных интегралов и площадей поверхности является достаточно корректным, приведём тестовый пример.

В качестве примера возьмём восьмую часть сферы. Для неё известна точная формула для вычисления площади поверхности, а именно:

$$S = \frac{\pi}{2} R^2, \quad (13)$$

где R – радиус сферы.

Данное геометрическое тело разобьём равноотстоящими друг от друга плоскостями, параллельными одной из его плоских граней. В результате пересечения этих плоскостей с поверхностью восьмой части сферы получим четвертинки окружностей, имеющих разный радиус.

Каждую такую четверть окружности разобьём по периметру равноотстоящими друг от друга точками. В результате соединения точек на соседних окружностях получим разбиение всей наружной поверхности восьмой части сферы на треугольники. Количество треугольников определяется числом окружностей и числом точек на окружностях. Точность расчёта зависит от числа треугольников, а значит от числа разбиений.

Покажем, как от числа разбиений зависит точность вычисления площади поверхности. Так, если взять десять окружностей и на каждой из них десять точек, то относительное отклонение площади поверхности, вычисленной по треугольникам от такой же площади, вычисленной аналитически, составит 0,6%. Если соответственно число разбиений составит 20 и 20, то относительное отклонение составит 0,2%. При дальнейшем увеличении числа разбиений происходит быстрый рост точности расчёта.

Для судна следует ожидать существенно лучший результат, так как судовая поверхность имеет существенно меньшую относительную кривизну, чем сфера, применённая для тестирования.

Таким образом, можно сделать вывод о хорошей сходимости предложенного метода вычисления поверхностных интегралов.

2. Реализация метода с помощью ЭВМ

Описанный метод вычисления геометрических характеристик реализован в компьютерной программе “Программа для расчёта ледового сопротивления” [5], которая позволяет также рассчитать ледовое сопротивление для разных ледовых условий существующего ледокола и судна, сгенерированного самой программой. Способ построения теоретического чертежа в программе по некоторым задаваемым параметрам описан в статье [2].

Для того чтобы рассчитать геометрические характеристики в указанной программе [5] реального судна – прототипа предварительно нужно снять координаты с теоретического чертежа, сформировать из них массив данных и записать в файл. Затем в самой программе нужно выбрать файл с массивом координат судна-прототипа, после этого на экране появится теоретический корпус, построенный с использованием кубического сплайна по заданным точкам. Также в диалоговом режиме

нужно задать осадку. Структура массива координат следующая.

В текстовом формате по порядку задаётся:

координата шпангоута, начиная с носа (ноль на миделе)

число точек на шпангоуте

координата Y пробел координата Z

координата Y пробел координата Z

и т.д.

Следующий шпангоут.

999 (после всех шпангоутов носовой части)

Все координаты в метрах.

Далее при расчёте в программе [5] геометрических характеристик прототипа происходит разбиение теоретического чертежа на треугольники так, как это описано выше. Разбиение на треугольники можно увидеть на трёх проекциях чертежа. Пример разбиения на треугольники на проекции “Корпус” показан на рисунке 1.

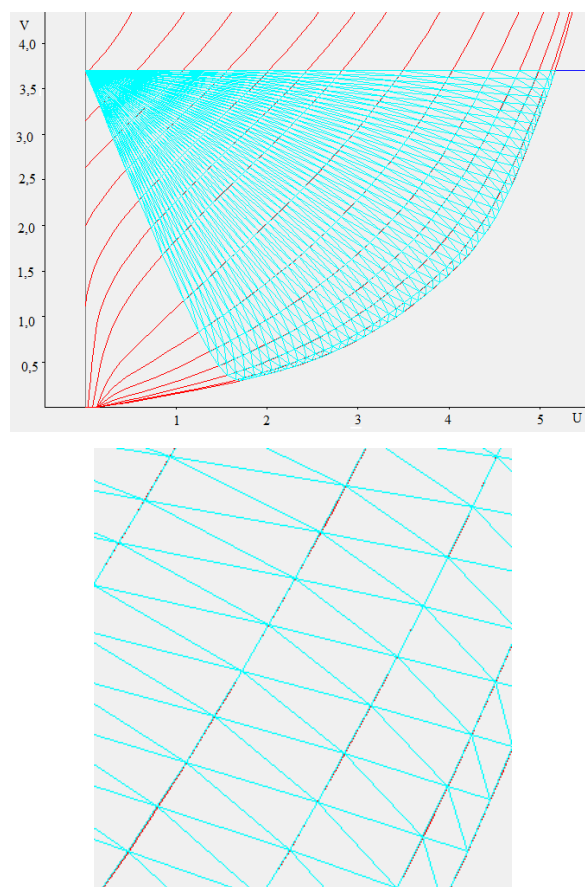


Рис. 1. Разбиение на треугольники носовой оконечности судна.

С помощью программы [5] были рассчитаны геометрические характеристики четырёх российских ледоколов и трёх иностранных [6], [7], [8]. Их теоретические корпуса приведены на рисунках 2 - 8, а геометрические характеристики для посадки по КВЛ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Геометрические характеристики формы корпуса ледоколов

Обозначение функции	Проекты						
	16	P47	1105	1191	Katmai bay	R-class	Healy
Страна	Россия	Россия	Россия	Россия	США	Канада	Канада
$\gamma_{лтф}$	3,535	3,095	3,614	3,602	3,467	3,631	3,645
$\gamma_{сф}$	0,973	0,528	0,679	0,306	1,220	0,623	0,711
$\Phi_{лт}$	5,263	4,145	5,640	6,940	5,101	6,019	6,1
Φ_c	1,410	0,922	1,149	0,696	1,449	1,739	1,17
$\Phi_{и}$	0,077	0,109	0,062	0,039	0,076	0,090	0,083
$\Phi_{ит}$	0,253	0,297	0,229	0,183	0,251	0,273	0,265
Φ_r	0,008	0,017	0,005	0,002	0,009	0,013	0,008
$\Phi_{гт}$	0,027	0,055	0,019	0,009	0,034	0,038	0,031
Φ_n	0,087	0,170	0,068	0,036	0,110	0,089	0,102
$\Phi_{пт}$	0,748	0,772	0,764	0,796	0,665	0,532	0,593
$\Omega_{л}, м^2$	181	55	486	853	143	731	1229

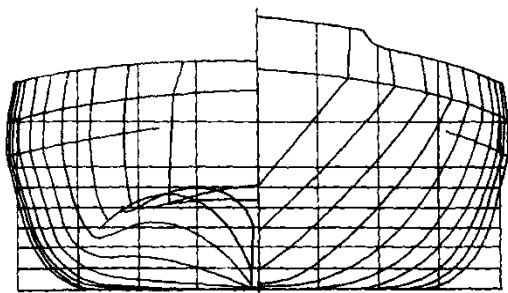


Рис. 2. Теоретический корпус ледокола проекта 16

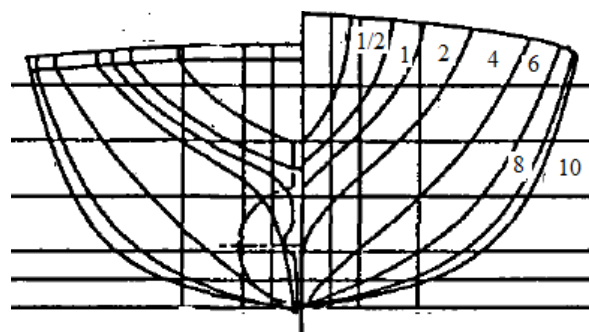


Рис. 5. Теоретический корпус ледокола Katmai bay

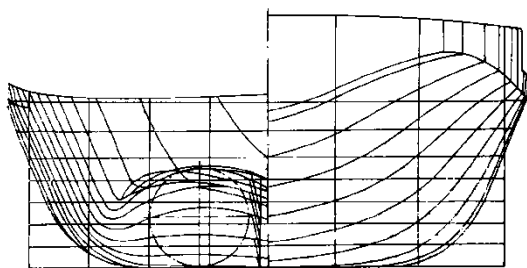


Рис. 3. Теоретический корпус ледокола проекта P47

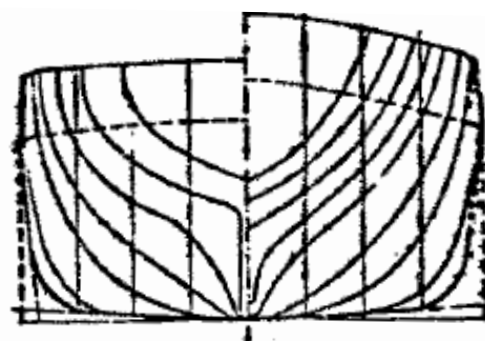


Рис. 6. Теоретический корпус ледокола R-class

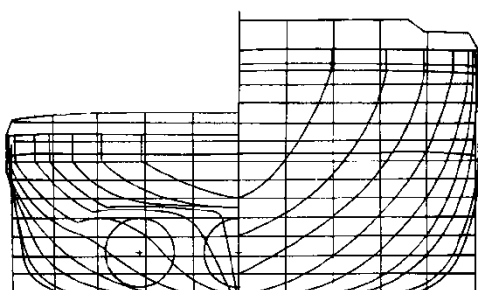


Рис. 4. Теоретический корпус ледокола проекта 1105

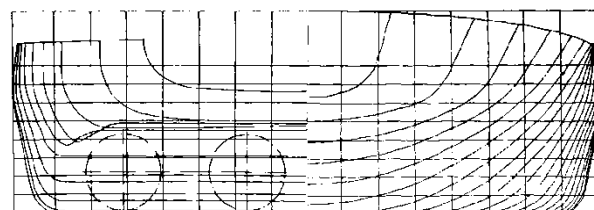


Рис. 7. Теоретический корпус ледокола проекта 1191

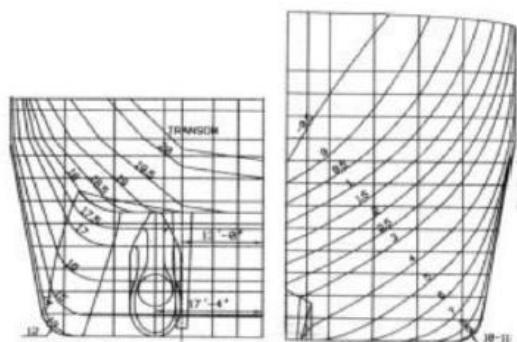


Рис. 8. Теоретический корпус ледокола Healy

Заключение

Предложен метод расчёта геометрических характеристик формы обводов носовой оконечности ледокола, которые представляют собой поверхностные интегралы, с помощью ЭВМ. Метод тестировался на сфере – теле с относительной кривизной существенно большей, чем кривизна судовой поверхности и показал хорошую сходимость с точными вычислениями. Этот метод значительно облегчает расчёт геометрических характеристик, является удобным и производительным, позволяет производить вычисления практически с любой точностью.

Литература

1. Ионов Б.П. Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. – СПб., Судостроение, 2013, 504 с.
2. Грамузов Е.М., Тихонова Н.Е. Генерирование теоретического чертежа при оптимизации основных проектных характеристик ледокола. Современные технологии в кораблестроительном и энергетическом образовании, науке и производстве: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. Нижний Новгород, НГТУ, 2006, С. 107-114.
3. Каштелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я. Сопротивление льда движению судна. Л., изд. «Судостроение», 1968, 238 с.
4. Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е. Испытания судов во льдах. Л., изд. «Судостроение», 1980, 207 с.
5. Тихонова Н.Е., Грамузов Е.М. Программа для расчёта ледового сопротивления // Программа для ЭВМ № 2025660300. Заявка № 2025618216, 11.04.2025. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ - 22.04.2025. Правообладатель – НГТУ им. Р.Е.Алексеева.
6. Kannari P., Humphreys D.H. Maneuvering performance in ice of the United States coast guard 140 – foot icebreaker // Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions: the Nine International Conference. Fairbanks, Alaska, USA, 1987. pp. 557 – 569.
7. Spencer D., Stephen J.J. Model – scale/Full – scale correlation in open water and ice for Canadian coast guard “R-class” icebreaker // Journal of Ship Research, Vol. 45, No. 4, 2001. pp. 249 – 261
8. Sodhi D.S., Griggs D.B., Tucker W.B. Ice performance tests of Uscgc Healy // POAC, № 1. Ottawa, Canada, 2004

References

1. Ionov B.P., Gramuzov E.N. Ledovaya khodkost' sudov [Ice propulsion of ships]: Monografiya, SPb.: Sudostroenie, 2013. 504 s.
2. Gramuzov E.M., Tihonova N.E. Generirovanie teoreticheskogo chertezha pri optimizacii osnovnykh proektnykh harakteristik ledokola [Generation of theoretical drawing for optimization of main design characteristics of icebreaker] // Sovremennye tehnologii v korablestroitel'nom i energeticheskom obrazovanii, nauke i proizvodstve: sbornik dokladov Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Nizhnij Novgorod, NGTU, 2006, S. 107-114.
3. Kashteljan V.I., Poznjak I.I., Ryvlin A.Ja. Soprotivlenie l'da dvizheniju sudna [Ice resistance to ship movement]. L.: Sudostroenie, 1968. 238 s.
4. Ryvlin A.Ja., Hejsin D.E. Ispytanija sudov vo l'dah [Testing ships in ice].L.: Sudostroenie, 1980. 207 s.
5. Tihonova N.E., Gramuzov E.M. Programma dlja raschjota ledovogo soprotivlenija [Program for calculating ice resistance] // Programma dlja JeVM № 2025660300. Zajavka № 2025618216, 11.04.2025. Data gosudarstvennoj registracii v Reestre programm dlja JeVM - 22.04.2025. Pravoobladatel' – NGTU im. R.E.Alekseeva.
6. Kannari P., Humphreys D.H. Maneuvering performance in ice of the United States coast guard 140 – foot icebreaker // Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions: the Nine International Conference. Fairbanks, Alaska, USA, 1987. pp. 557 – 569.
7. Spencer D., Stephen J.J. Model – scale/Full – scale correlation in open water and ice for Canadian coast guard “R-class” icebreaker // Journal of Ship Research, Vol. 45, No. 4, 2001. pp. 249 – 261
8. Sodhi D.S., Griggs D.B., Tucker W.B. Ice performance tests of Uscgc Healy // POAC, № 1. Ottawa, Canada, 2004

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

Тихонова Наталья Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры “Теоретическая и прикладная механика”, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: netikhonova@gmail.com

Natalya E. Tikhonova, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: netikhonova@gmail.com

Тихонов Михаил Юрьевич, генеральный директор ООО “Судостроительная компания Ракета”, 607600, Нижегородская область, Богородский район, город Богородск, Дуденевское ш., д. 3, офис 22, e-mail: miktih@gmail.com

Mikhail Yu. Tikhonov, General Director of Raketa Shipbuilding Company LLC, 607600, Nizhny Novgorod Region, Bogorodsky District, Bogorodsk, Dudenevskoe Highway, Bldg. 3, Office 22, e-mail: miktih@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 11.01.2026.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.02.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 14.02.2026.

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS

Научная статья

УДК 539.422.224:004.942:624.042.43:629.5.023

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.002>

Применение бессеточных процедур для численного моделирования взаимодействия прямостенного борта судна с ледовым покровом

Родионов А.А.¹ rodionovsmk@yandex.ru, Рябушкин С.В.¹ serg.ryabuschkin@yandex.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье рассмотрена задача взаимодействия прямостенного борта судна с ледовым покровом для определения действующей на него ледовой нагрузки. Решение задачи выполняется численно на базе разработанной авторами бессеточной модели льда, откалиброванной по результатам соответствующих теоретических и экспериментальных исследований. Модель позволяет проводить моделирование взаимодействия прямостенного борта со льдом, получать оценку параметров ледовой нагрузки для различных расчетных сценариев (различных скоростей, прочностных характеристик льда и т.д.), а также получать картины напряженно-деформированного состояния конструкции в процессе взаимодействия. Указанное позволяет совместно решать проблему внешних сил и внутренних усилий в рамках одного расчета. Полученные результаты могут быть использованы для проверки несущей способности конструкции, оценки ее возможных опасных состояний для различных вариантов ледового нагружения. Для получения комплексных оценок, численная модель используется совместно с представленной аналитической моделью взаимодействия прямостенного борта со льдом.

Ключевые слова: численное моделирование, бессеточные методы, ледовые нагрузки, прямостенный борт судна, ледовая прочность, контактное взаимодействие, модель ледовых нагрузок.

Финансирование: Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке в рамках государственного задания на выполнение научно-исследовательских работ № 075-03-2025-584 от 17 января 2025 г.

Для цитирования: Родионов А.А., Рябушкин С.В. Применение бессеточных процедур для численного моделирования взаимодействия прямостенного борта судна с ледовым покровом, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 20—31. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.002.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.002>

Application of meshless procedures to numerical simulate the interaction between a wall-sided ship's hull and an ice cover

Aleksandr A. Rodionov¹ rodionovsmk@yandex.ru, Sergey V. Ryabushkin¹ serg.ryabuschkin@yandex.ru

¹St. Petersburg State Marine Technical University, Russian Federation

Abstract. The paper considers the interaction between a wall-sided ship's hull and an ice cover to determine the resulting ice load. The problem is solved numerically using a mesh-free ice model developed by the authors and calibrated using relevant theoretical and experimental data. The model enables simulation of the interaction between a wall-sided ship's hull and ice medium, estimation of ice load parameters under various scenarios (different velocities, ice strength properties, etc.) and evaluation of the stress-strain state of the structure during the interaction. This approach enables simultaneous analysis of external forces and internal stresses within a single simulation run. The results can be used to assess the load-carrying capacity of the structure and identify its potential failure states under various ice loading scenarios. For more comprehensive assessment, the numerical model is used in conjunction with the developed analytical model of ice/wall-side interaction, also submitted in the paper.

Keywords: numerical simulation, meshless methods, ice loads, wall-sided ship's hull, ice load-carrying capacity of a structure, contact interaction, ice load model.

Financial Support: The study was carried out with partial financial support within the framework of the state assignment for the implementation of scientific research No. 075-03-2025-584 dated 01/17/2025

For citation: Aleksandr A. Rodionov, Sergey V. Ryabushkin Application of meshless procedures to numerical simulate the interaction between a wall-sided ship's hull and an ice cover, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 20—31. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.002.

Введение

Активная эксплуатация судов в ледовых условиях обуславливает повышенный уровень ледового воздействия на конструкцию их корпуса.

Обеспечение ледовой прочности является одной из “узловых” задач для безопасной и эффективной эксплуатации судна ледового плавания. Для этой цели необходимо определение ледовых нагрузок, действующих на его корпус при работе во льдах.

Одним из способов решения проблемы внешних сил является применение математических моделей взаимодействия со льдом.

Перспективным направлением для совершенствования данных моделей является их насыщение результатами соответствующих модельных, натурных, а также вычислительных экспериментов с использованием современных инструментов численного моделирования.

В статье представлены основные аспекты применения численных методов в решении задач взаимодействия судна с ледовым покровом для определения параметров ледовой нагрузки на его корпус.

Использование численных моделей, откалиброванных на соответствующих экспериментальных данных, открывает возможности для совместного решения проблемы внешних сил и внутренних усилий в рамках одного расчета.

1. Сценарий взаимодействия прямостенного борта судна с ледовым покровом

В данной статье рассматривается сценарий взаимодействия **прямостенного борта** со льдом, являющийся одним из эксплуатационных сценариев взаимодействия [1,2].

Указанный сценарий реализуется при сжатии судна ледовым покровом, когда ледовое нагружение приходится на цилиндрическую вставку его корпуса.

Наибольшая нагрузка в данном случае обусловлена от разрушения ровного ледового покрова или консолидированной части тороса. Указанное нагружение принимается далее в качестве расчетного [1,2,4,5].

Условие реализации данного сценария может быть сформулировано в виде [1,2]:

$$\beta' \leq \arctg(f_d), \quad (1)$$

где β' – угол развала борта (наклона шпангоута) в плоскости, перпендикулярной ватерлинии (ВЛ), рис. 1; f_d – коэффициент динамического трения льда о поверхность корпуса.

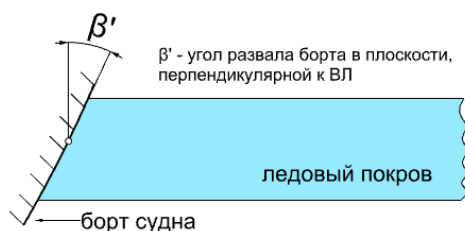


Рис. 1. К определению сценария взаимодействия корпуса судна со льдом

Картина повреждения конструкции прямостенного борта при взаимодействии с ледовым покровом представлена на рис. 2 [3].



Рис. 2. Картина повреждения прямостенного борта при взаимодействии с ледовым покровом [3]

Обеспечение прочности прямостенного борта судна требует разработки и применения расчетных моделей для определения параметров силового воздействия на него со стороны ледовой среды (интегральной нагрузки, величины и распределения давлений, а также размеров зоны контакта со льдом).

Предварительно рассматривается плоская (2D) задача внедрения вертикальной стенки в лед (п.2). Ее решение служит фундаментом для модели пространственного (3D) взаимодействия (п.3).

2. Плоская (2D) задача взаимодействия

В п.2 представлена расчетная модель по определению параметров **плоского контакта** вертикальной стенки (борта) со льдом.

Модель основана на подходах, изложенных в работах [1,2,4,5] и др., и уточнена по результатам дополнительных исследований п.2.2-2.4 (в т.ч. с применением инструментов численного моделирования).

2.1. Характерные особенности взаимодействия

На рис.3 ниже, по результатам анализа исследований, обобщенных в работах [3,6-14,15] и др., представлены основные этапы, характерные особенности взаимодействия вертикальной стенки со льдом.

В начале процесса внедрения происходит инициализация контакта, сопровождающаяся разрушением льда (образованием зон смятия) по всей высоте зоны контакта $b \approx h_{ice}$ (стадия 1 на рис.3). Ледовая нагрузка (давления) при этом действуют по всей поверхности стенки. Стадия 1 является непродолжительной [15], что позволяет рассматривать ее как **неустановившуюся**.

При дальнейшем внедрении стенки происходит резкое уменьшение высоты зоны контакта $b < h_{ice}$ вследствие образования трещин в поперечном сечении ледового покрова, откалывающих крупные фрагменты льда в верхней и нижней частях зоны контакта. Указанный процесс сопровождается перераспределением контактных усилий и локализацией зоны смятия примерно по середине толщины льда h_{ice} (стадия 2 на рис.3), что обуславливает наблюдаемый характер распределения ледовой нагрузки на прямостенную конструкцию по линии (т.н. *line-like load*) [15]. Анализ

исследований показывает [15], что в данном случае нагрузка на стенку является стабильной во времени, что позволяет рассматривать стадию 2 как установившуюся.

На этой стадии продолжается последующее откалывание боковых фрагментов льда при

внедрении стенки, не приводящих к существенному изменению высоты зоны контакта b , рис. 3.

Расчет несущей способности конструкции под действием ледовой нагрузки необходимо проводить с учетом изменения высоты зоны контакта b в процессе ее взаимодействия со льдом.

Стадия 1. Неустановившаяся стадия взаимодействия стенки со льдом **Стадия 2. Установившаяся стадия взаимодействия стенки со льдом** **Формирование последующих сколов льда**

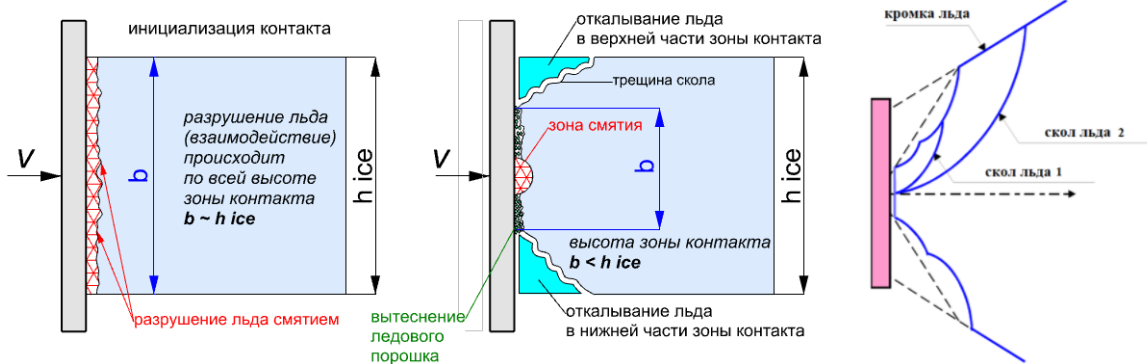


Рис. 3. Основные этапы (стадии) и характерные особенности взаимодействия вертикальной стенки с ровным ледовым покровом, по материалам исследований [3,6-14] и др.

2.2. Разработка расчетной схемы силового взаимодействия вертикальной стенки со льдом

На рис. 4 ниже представлена расчетная схема силового взаимодействия вертикальной стенки со льдом (для установившегося режима, см. рис. 3).

В данном случае основная ледовая нагрузка на конструкцию возникает от смятия льда. Процесс смятия льда моделируется с учетом образования трещин скола.

Расчетная схема силового взаимодействия вертикальной стенки со льдом

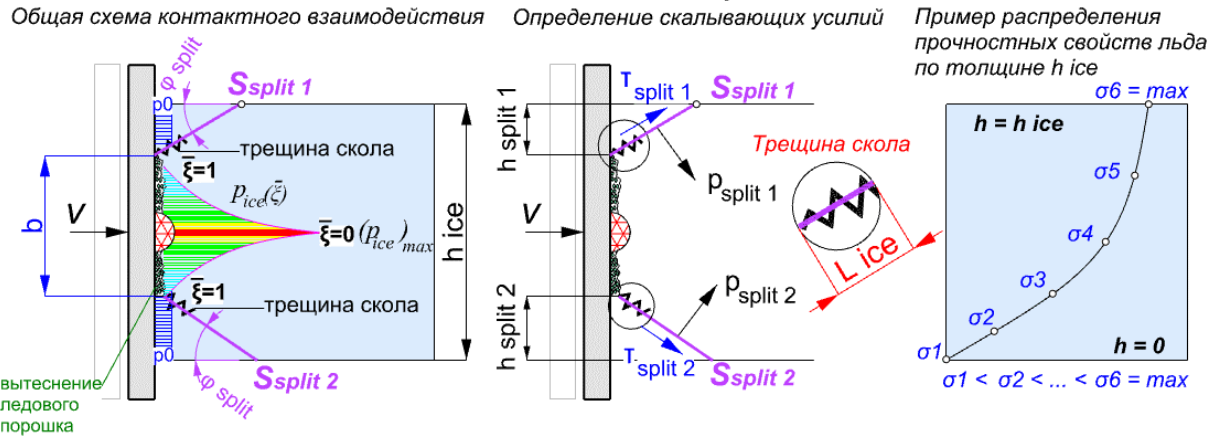


Рис. 4. Расчетная схема силового взаимодействия вертикальной стенки со льдом (установившийся режим)

Ледовые давления, действующие на стенку (рис. 4), определяются на базе гидродинамической модели вытеснения ледового порошка (ГДМ) [16]:

- максимальные (пиковые) давления в зоне смятия $(p_{ice})_{max}$ (МПа):

$$(p_{ice})_{max} = 15 (\sigma_{UCS})^{0.6}, \quad (2)$$

где σ_{UCS} – предел прочности на одноосное сжатие (стандартный ледовый образец), МПа;

- распределение ледовых давлений $p_{ice}(\bar{\xi})$ по высоте зоны контакта $\bar{\xi}$ (высоте стенки, рис. 4):

$$p_{ice}(\bar{\xi}) = \left\{ a \cdot \exp\left(-\frac{\bar{\xi}}{b}\right) + c \cdot \exp\left(-\frac{\bar{\xi}}{d}\right) \right\} \cdot (p_{ice})_{max}, \quad (3)$$

где $\bar{\xi} = [0, 1]$; $\bar{\xi} = 0$, $\bar{\xi} = 1$ – начало и конец зоны контакта соответственно; a, b, c, d – коэффициенты аппроксимации [16].

Для назначения высоты зоны контакта b требуется установление момента наступления разрушения ледового покрова в виде крупных боковых сколов, приводящих к тому, что $b < h_{ice}$.

Указанная оценка может быть выполнена следующим образом:

1. Эксперименты по внедрению инденторов различной формы в лед [10,17,18] показывают, что разрушение льда скалыванием происходит при относительно постоянном значении угла скола φ_{split} (рис. 4):

$$\varphi_{split} \approx 45^\circ - \varphi/2, \quad (4)$$

где φ – угол внутреннего трения льда (параметр материала), см. ниже.

Расчетная поверхность скола (среза) S_{split} показана на рис. 4.

2. Вдоль расчетной поверхности скола при внедрении стенки действуют усилия (рис. 4): τ_{split} (срезающее усилие), p_{split} (прижимающее усилие).

Указанные величины определяются как:

$$p_{split} = f_{ice} \cdot \cos(\varphi_{split}), \text{ Н/м} \quad (5)$$

$$\tau_{split} = f_{ice} \cdot \sin(\varphi_{split}), \text{ Н/м} \quad (6)$$

и являются проекциями удельной ледовой силы

$$f_{ice} = \int_0^{b'} p_{ice}(\xi) d\xi + p'_0 \frac{(h_{ice} - b')}{2}, \text{ Н/м} \quad (7)$$

к расчетной поверхности скола, рис. 4. Здесь b' – расчетная высота зоны контакта со льдом, м; p'_0 – среднее давление, действующее на скалываемый фрагмент льда со стороны стенки, рис. 4.

3. Предполагается, что усилия p_{split} , τ_{split} , действующие в плоскости S_{split} , являются причиной образования боковых сколов льда.

Расчетная интенсивность (в МПа) указанных усилий определяется как:

$$(p_{split})^* = p_{split}/L_{ice} \text{ (МПа)}, \quad (8)$$

$$(\tau_{split})^* = \tau_{split}/L_{ice} \text{ (МПа)}, \quad (9)$$

где L_{ice} – характерный линейный размер зоны скалывания, м, как показано на рис. 4.

Линейный размер L_{ice} ассоциируется с критической длиной трещины сдвига, при достижении которой реализуется боковой скол льда. Параметр L_{ice} может быть определен на базе подходов линейной механики разрушения (ЛМР) [19] как:

$$L_{ice}(II \text{ мода}) = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{K_{IIc}}{\tau_{shear}} \right)^2, \quad (10)$$

где K_{IIc} – критический коэффициент интенсивности напряжений (КИН) (II мода), МПа·м^{1/2}; τ_{shear} – предел прочности льда на срез, МПа.

Результаты экспериментов по определению трещиностойкости льда (K_{IC} , K_{IIc}) для оценки L_{ice} могут быть найдены, например, в работах [20-22], измерения $\tau_{failure}$ – в работе [23], см. также ниже.

4. В качестве критерия прочности льда на скалывание принимается критерий Кулона-Мора [24-26]:

$$\tau_{failure} \leq (\tau_{split})^* = c + tg(\varphi) \cdot (p_{split})^*, \quad (11)$$

где $\tau_{failure}$ – касательное напряжение разрушения, МПа; c – сцепление (когезионная прочность льда), МПа; φ – угол внутреннего трения льда, град.

По данным исследований [10,17,24-26], можно рекомендовать следующие зависимости для определения указанных параметров:

$$c = 1,06 \cdot \sigma_{UCS} \cdot \sqrt{\frac{1-\mu}{\mu+3,25}}, \quad (12)$$

где σ_{UCS} – предел прочности на одноосное сжатие (стандартный образец), МПа; $\mu \approx 0,1$ – коэффициент внутреннего трения;

$$\varphi = \arcsin(0,47\mu + 0,53). \quad (13)$$

На основании (13), расчетное значение φ для льда составляет $\sim 35^\circ$.

Удельные усилия $(p_{split})^*$, $(\tau_{split})^*$ в критерии (11) определяются с учетом неравномерного распределения ледовых давлений $p_{ice}(\xi)$ (3) по высоте зоны контакта $\bar{\xi}$, рис. 4.

Критерий (11) является определяющим при оценке расчетной высоты зоны контакта b конструкции (стенки) со льдом.

5. Учет скорости взаимодействия производится путем введения зависимости параметров материала, входящих в критерий (11), от скорости нагружения.

5.1. Согласно положениям ЛМР [19], величина предельного разрушающего усилия $\tau_{failure}$ в (11) пропорциональна $\sim K_{IIc}$.

Влияние скорости нагружения на K_{IC} , K_{IIc} экспериментально изучено, см. работы [20-22]. Характерная зависимость $K_{IC} = f(\dot{K}_{IC})$ [20], где $\dot{K}_{IC}$ – скорость деформации, представлена на рис. 5 ниже. Функция $K_{IIc} = f(\dot{K}_{IIc})$ имеет аналогичный характер, см. [21,22].

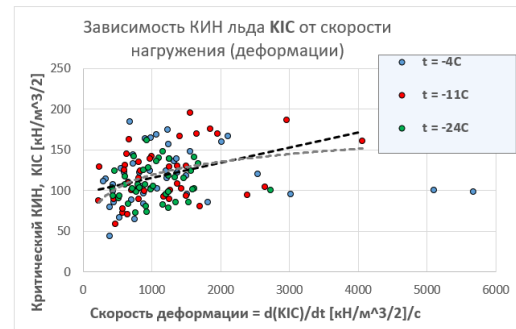


Рис. 5. Зависимость КИН K_{IC} льда от скорости деформации $\dot{K}_{IC}$, по данным [20]

5.2. Влияние скорости на параметры модели Кулона-Мора c , φ (11) учитывается следующим образом:

- величина сцепления (когезионной прочности льда) c оценивается по (12), с учетом характерной зависимости σ_{UCS} от скорости, определенной на базе экспериментальных исследований [27-29];

- угол внутреннего трения льда φ (13) слабо зависит от скорости, см. [30], и принят постоянным.

Возрастание значений c , K_{IC} , K_{IIc} с ростом скорости, как следствие, приводит к увеличению величины разрушающих усилий $\tau_{failure}$ (11), необходимых для откалывания фрагментов льда.

Указанное является причиной увеличения высоты зоны контакта b и уменьшения размеров обломков льда h_{split} (рис. 4) с ростом скорости, что наблюдается экспериментально, см. [31], см. также п.2.4 ниже.

6. В расчетной схеме учтен неравномерный характер распределения физико-механических характеристик (ФМХ) льда по его толщине h_{ice} [23].

Пример распределения прочности льда на сжатие $\sigma_{UCS} = f(h_{ice})$ по толщине представлен на рис. 4 выше (консолидированный слой).

Характер распределения ФМХ может быть изменен, с учетом морфологических характеристик ледовых образований.

Неравномерность ФМХ льда обуславливает его неравномерное откалывание в верхней и нижней частях зоны контакта, как показано на рис. 3-4 (при этом размеры обломков льда $(h_{split})_1 < (h_{split})_2$).

Представленная аналитическая модель взаимодействия является дополнительным инструментом, источником данных для калибровки и "настройки" соответствующей численной модели, а также верификации получаемых с ее помощью результатов расчетов (моделирования), см. ниже.

2.3. Численное моделирование контакта вертикальной стенки со льдом

Для получения более полной картины взаимодействия, решение поставленной задачи выполняется также численно.

Для этой цели используется разработанная авторами бессеточная модель льда, подробнее см. работы [15,32].

Численная модель для расчета внедрения стенки в ровный лед представлена на рис. 6. Распределение ФМХ по толщине льда (см. рис. 4) моделируется послойно, как показано на рис. 6. Предполагается, что материал (лед) "работает" в условиях плоской деформации.

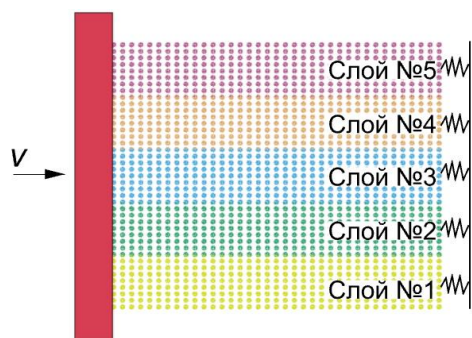
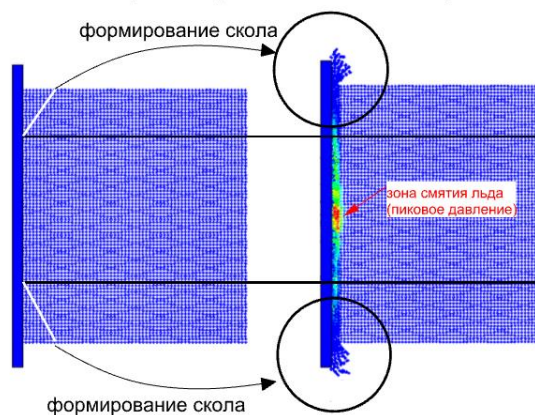


Рис. 6. Численная модель для расчета внедрения вертикальной стенки в лед (2D-постановка задачи)

а) Картина распределения контактных ледовых давлений при внедрении стенки в лед, $v = 5$ м/с



Расчет выполняется для ряда скоростей внедрения $v = 1 \frac{\text{см}}{\text{с}}; 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}; 2,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ и $5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, покрывающих скоростной режим работы инженерных конструкций во льдах.

В качестве примера, на рис. 7 представлены результаты численного расчета для предельной скорости внедрения стенки $v = 5$ м/с:

- на рис. 7(а) представлена картина распределения контактных давлений. Наблюдается локализация пиковых давлений по высоте $\sim h_{ice}/2$. Распределение ледовых давлений является существенно неравномерным. Указанное согласуется с результатами экспериментов, основными положениями ГДМ (см. рис. 3 выше);

- на рис. 7(б) представлена картина распределения срезающих (сдвиговых) усилий в ледовом покрове, приводящих к его разрушению в виде боковых сколов. Их реализация приводит к уменьшению расчетной высоты зоны контакта стенки со льдом.

Для сравнения, на рис. 7(б) также представлена картина распределения скалывающих усилий для $v = 1$ см/с (квазистатический режим). Можно видеть, рис. 7(б), что картина распределения усилий меняется с изменением скорости. Реализация указанных усилий в дальнейшем ассоциируется с моментом наступления боковых сколов льда.

Результаты расчетов использованы при формировании соответствующих оценок (п.2.4).

б) Картина распределения скалывающих усилий в ледовом покрове при внедрении стенки

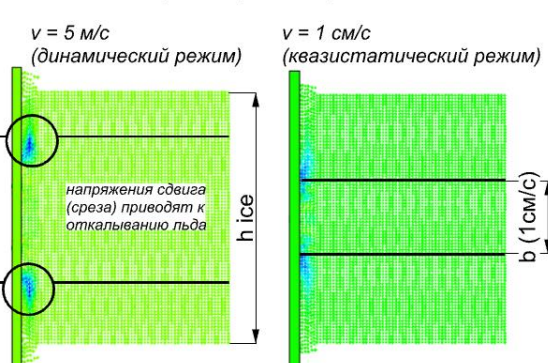


Рис. 7. Результаты численного моделирования внедрения вертикальной стенки в ровный лед: (а) – картина распределения контактных давлений; (б) – картина распределения скалывающих усилий в ледовое покрове

2.4. Назначение расчетной высоты зоны контакта b

Оценка параметра b (с учетом скорости) является необходимой для проведения расчетов ледовой прочности конструкции.

Указанная оценка выполняется комплексно, на базе разработанных аналитической (п.2.2) и численной (п.2.3) моделей.

По результатам расчетов получена следующая зависимость для определения b :

$$b = k_0 \cdot k_{dyn} \cdot h_{ice}, \quad (14)$$

где k_0, k_{dyn} – статический (при малых скоростях) и динамический коэффициенты скола, см. [1,2]; h_{ice} – толщина льда, м.

- Коэффициент k_0 определен на базе расчетной модели п.2.2 для статической постановки задачи. Расчеты показывают, что в данном случае зона контакта b значительно меньше толщины льда h_{ice} и составляет порядка $\sim(0,16 - 0,20) h_{ice}$, с учетом разброса значений K_{IC}, K_{IIC} (рис. 5). Аналогичная оценка получена на базе численной модели, см. рис. 7(b) выше.

Полученный результат подтверждается натурными исследованиями ледового воздействия на инженерные сооружения [3,10,17].

- Коэффициент $k_{dyn} = f(v)$ учитывает влияние скорости v на высоту зоны контакта b . Указанная зависимость определена на базе модели п. 2.2, а также численно, п. 2.3. Результаты расчетов представлены на рис. 8 ниже.

Рост скорости приводит к нелинейному увеличению b . Для предельных скоростей ($v = 5$ м/с) высота зоны контакта b возрастает до $\sim(0,5 - 0,6) h_{ice}$, что объясняется увеличением трещиностойкости (КИН K_{IC}, K_{IIC} , рис. 5), а также когезионной прочности льда c с ростом скорости деформации (п. 2.2).

Численное решение задачи (п. 2.3) позволяет получить картины распространения сдвиговых усилий (с учетом скорости взаимодействия), реализация которых ассоциируется с моментом наступления боковых сколов льда.

Результаты моделирования, рис. 7 выше, показывают уменьшение размеров обломков льда h_{split} (т.е. увеличение высоты зоны контакта b) с ростом скорости внедрения v , см. рис. 8 ниже.

Результаты расчетов (рис. 8) подтверждаются экспериментами по разрушению крупногабаритных образцов льда (скорости нагружения до ~ 5 м/с) [33].

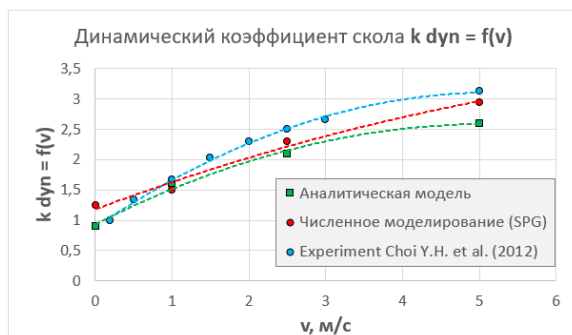


Рис. 8. Динамический коэффициент скола k_{dyn} в зависимости от скорости внедрения стенки в лед

Анализ рис. 8 показывает незначительные расхождения в значениях k_{dyn} , что позволяет принять полученные результаты в качестве удовлетворительных.

3. Пространственная (3D) задача взаимодействия

Решение плоской задачи (п. 2) служит фундаментом для модели пространственного (3D) взаимодействия прямого борта судна со льдом.

3.1. Расчетная схема силового взаимодействия прямого борта судна со льдом

Расчетная схема силового взаимодействия прямого борта со льдом, разработанная на базе работ [1,2,4,5] представлена на рис. 9 ниже.

Ледовые давления, действующие на борт, являются *неравномерными* и определяются на базе гидродинамической модели (ГДМ), см. выражения (2), (3), а также рис. 4, 7 выше.

Среднее (эквивалентное равномерное) давление $p_0(dw \rightarrow 0)$ в сечении зоны контакта dw (рис. 9) определяется из (3) как:

$$p_0 = p_0(dw \rightarrow 0) \approx K \cdot (p_{ice})_{max}, \quad (15)$$

где $(p_{ice})_{max}$ – пиковое давление в зоне смятия (2); K – коэффициент, определяемый как:

$$K = \int_{\xi=0}^{\xi=1} \{a \cdot \exp(-\frac{\xi}{b}) + c \cdot \exp(-\frac{\xi}{d})\} d\xi, \quad (16)$$

где a, b, c, d – коэффициенты [16], см. выше.

Интегральная ледовая нагрузка на корпус судна определяется с учетом масштабного фактора $k_{scale}(w)$, обусловленного неодновременностью разрушения льда (образования зон смятия, рис. 9) вдоль зоны контакта протяженностью w [4,5,16]:

$$k_{scale}(w) = c \cdot \exp(-w/\theta) + k, \quad (17)$$

где c, θ, k – коэффициенты, определенные в работах [4,5,16], по результатам обработки натурных данных по ледовым нагрузкам на корпусах ледоколов и судов ледового плавания [34], также см. работы [1,2].

С учетом изложенного, расчетная интегральная сила F_{ice} , действующая на прямоотенный борт со стороны льда, рассчитывается как:

$$F_{ice} = p_0(dw \rightarrow 0) \cdot k_{scale}(w) \cdot [b \cdot w]. \quad (18)$$

Высота зоны контакта b определяется на основании положений п. 2.4 выше.

Длина зоны контакта w , для расчетов прочности конструкции, может быть назначена (принята), например, соответствующей шпации, длине перекрытия между рамными шпангоутами судна.

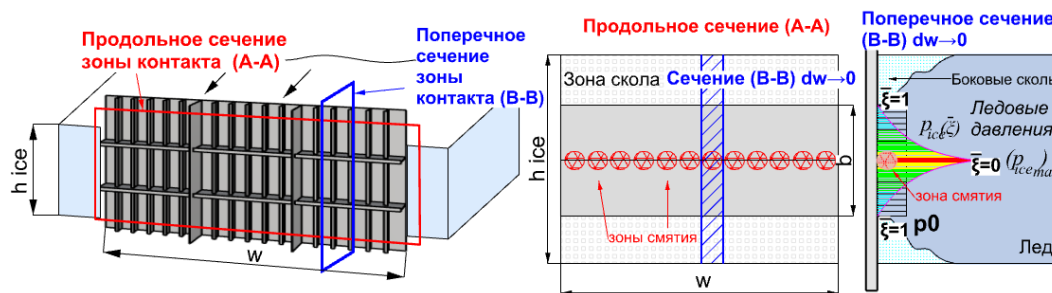


Рис. 9. Расчетная схема силового взаимодействия прямостенной конструкции (борта судна) со льдом

3.2. Численное моделирование контакта прямостенного борта со льдом

Дополнительным инструментом для исследования процесса взаимодействия является численное моделирование.

В расчетах используется бессеточная модель льда [32], см. п. 2.3 выше.

Предварительно проведены тестирование и «настройка» модели на предмет корректного воспроизведения ею зависимости интегральной ледовой нагрузки от размеров зоны контакта со льдом (зависимость «давление-площадь») [15].

Пример расчета

Рассматривается сценарий сжатия судна ледовым покровом, при котором ледовое нагружение приходится на цилиндрическую вставку его корпуса (прямостенный борт).

Указанный сценарий представляет наибольший практический интерес. В данном случае, предельные скорости контакта конструкции борта со льдом составляют порядка $\sim 0,5$ м/с.

Пример численной модели для расчета взаимодействия приведен на рис. 10 ниже.

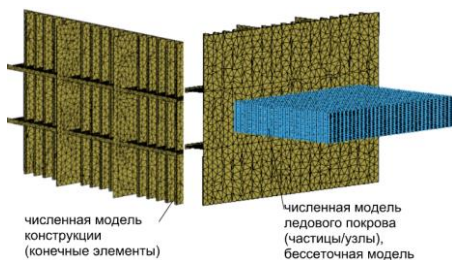
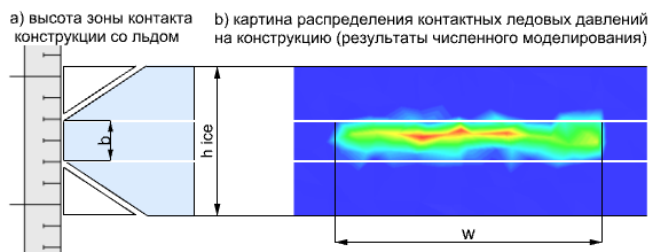


Рис. 10. Пример численной модели для расчета 3D взаимодействия прямостенного борта со льдом

Характер распределения прочностных свойств по толщине льда h_{ice} показан на рис. 4, [23]; его задание в численной модели выполняется послойно, как показано на рис. 6 выше.



Основные параметры расчета:

$h_{ice} = 3$ м - толщина льда
 $w = 2.5$ м - длина зоны контакта
 $b = 0.25$ м - высота зоны контакта
 $\sigma_{UCS} = 10$ МПа - расчетный предел прочности льда на одноосное сжатие;
 $p_{average} = 4.2$ МПа - среднее ледовое давление
 $F_{ice} = 7.85$ МН - расчетная интегральная ледовая сила на конструкцию

Рис. 11. Взаимодействие прямостенного борта с ледовой средой. Сценарий сжатия судна во льдах. Картина распределения контактных ледовых давлений (численное моделирование)

Интегральная ледовая сила, действующая на борт судна, определяется интегрированием рассчитанных давлений, рис. 11, по площади всей зоны контакта со льдом.

Для рассматриваемой задачи: ее значение составляет порядка $F_{ice} \approx 7,85$ МН.

Сопоставимое значение интегральной ледовой нагрузки можно получить на базе расчетной (аналитической) модели п. 3.1, выражение (18).

Следует отметить, что при небольших скоростях контакта удельная ледовая нагрузка f_{ice} (КН/м) на прямостенную конструкцию также может быть оценена по формуле (20) ниже, разработанной на базе соответствующих натурных исследований [35]:

$$f_{ice} = F_{ice}/w = \gamma \cdot (w)^\alpha \cdot (h_{ice})^\beta \left(\frac{\text{КН}}{\text{м}}\right), \quad (20)$$

где α, β, γ – эмпирические коэффициенты, подробнее см. [35]. Размерности w, h_{ice} (м).

Результаты численного расчета (рис. 11) согласуются с оценками (18), (20). Расхождение в результатах расчетов не превосходит $\pm 10\%$, что позволяет принять их как удовлетворительные.

4. Связанное решение первой и второй проблем строительной механики корабля в рамках единой численной модели

Применение численных моделей для связанного решения первой и второй проблем строительной механики (определение внешних нагрузок и расчет отклика конструкции) является актуальным и перспективным направлением современной вычислительной механики.

Полученные результаты (п.2-3) могут быть напрямую использованы для решения указанной задачи.

Пример расчета

В качестве примера рассматривается представленный выше расчет взаимодействия прямостенного борта судна с ледовым покровом, рис. 11.

Фрагмент борта моделируется в виде простейшего судового перекрытия, рис. 10.

Определение внешней (ледовой) нагрузки (интегральная сила, контактные давления) выполняется с помощью метода частиц; расчет отклика конструкции выполняется методом конечных элементов (МКЭ).

Результаты связанного расчета представлены на рис. 12 ниже. В рамках расчета выполняется оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) обшивки, стрингера и шпангоута в составе набора.

Для рассматриваемого примера: видно, что несущая способность набора обеспечивается. Наибольшие напряжения возникают на пластинах обшивки, промежуточных шпангоутах, что в данном случае может являться основанием для их более детального анализа.

Результаты показывают, что использование связанного расчета (метод частиц в связке с МКЭ) позволяет получать картины НДС конструкции в режиме “реального времени”, что позволяет оценивать ее несущую способность, возможные опасные состояния при различных параметрах силового воздействия со стороны ледовой среды, см. ниже.

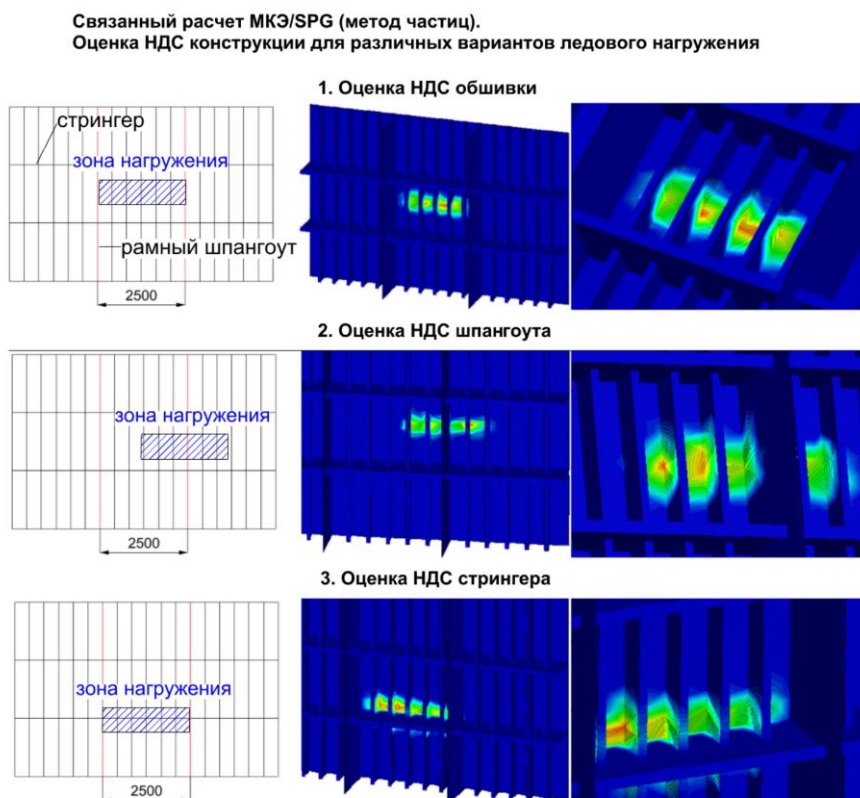


Рис. 12. Пример связанного расчета методом частиц/МКЭ. Взаимодействие прямостенного борта судна с ледовым покровом (сценарий сжатия судна во льдах), см. рис. 11. Эквивалентные напряжения по Мизесу

Заключение. Практическое приложение разработанной модели

В работе рассмотрена задача скоростного контактного взаимодействия *прямоугольного* борта судна с ледовым покровом с целью определения возникающей ледовой нагрузки для обеспечения прочности конструкции его корпуса.

Для решения поставленной задачи авторами разработана численная модель, откалиброванная по результатам соответствующих теоретических и экспериментальных исследований. Указанная модель позволяет оценивать параметры силового воздействия льда на борт судна (величину нагрузки, размеры зоны контакта), с учетом скорости взаимодействия, прочностных характеристик ледовой среды.

Для получения комплексных оценок, численная модель используется совместно с уточненной аналитической моделью взаимодействия борта со льдом. Достигнута удовлетворительная согласованность в результатах расчетов.

Разработанная численная модель рассматривается как дополнительный инструмент решения задачи взаимодействия корпуса судна со льдом, позволяющий:

- в автоматизированном режиме проводить моделирование взаимодействия и получать оценку параметров ледовой нагрузки на конструкцию (ее величины, размера зоны контакта) для различных расчетных сценариев (различных скоростей, прочностных характеристик льда и т.д.);

- получать картины НДС конструкции в режиме «реального времени» (в процессе взаимодействия со льдом) для интересующих расчетных сценариев.

Полученные результаты могут быть использованы для первоначальной проверки несущей способности конструкции, оценки ее возможных опасных состояний для различных вариантов ледового нагружения.

Перечисленное, для упрощенной модели судового перекрытия, продемонстрировано в расчетах выше.

Детальные расчеты прочности (на более детализированной КЭ-модели конструкции) под действием расчетной ледовой нагрузки также могут быть выполнены отдельно.

Методика проведения расчетов прочности, включая критерии обеспечения ледовой прочности, может быть найдена в работах [1,2,4,5].

Результаты расчетов могут быть использованы для обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации конструкции в ледовых условиях.

Литература

1. Andryushin A.V., Zuev P.S., Kuteinikov M.A., Grigor'yeva O.A., Bolshev A.S., Frolov S.A. Determination of ice loads acting on bow and stern of modern ice ships and icebreakers // Proceedings of the 26th International Ocean & Polar Engineering Conference (ISOPE-2016), Rhodes, Greece, June 2016.
2. Andryushin A., Zuev P., Kuteinikov M., Grigorjeva O., Bolshev A., Frolov S. Ice loads on the ships with hull forms differing from the regulated by RS Rules // Morskoi Vestnik, Special edition № 1 (13), 2017.
3. Riska K.A. Ship-Ice Interaction in Ship Design: Theory and Practice. Helsinki, Finland: ILS Oy; Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2006. 120 p.
4. Andryushin A.V., Zuev P.S., Voronin A.Y., Fedoseev S.S., Ryabushkin S.V., Kuteinikov M.A. Ensuring of the strength of large arctic LNG carriers and oil tankers for year-round transportation in the Arctic conditions. Proceedings of the Thirty-second International Ocean and Polar Engineering Conference, Shanghai, China, 2022.
5. Andryushin A.V., Voronin A.Yu., Ryabushkin S.V., Fedoseev S.S., Shapkov E.V. Hull and propulsion complex strength assurance of the large-capacity arctic ships. Proceedings of the 13th International Conference "Naval Fleet and Shipbuilding in Modern Conditions" (NSN'2024), Saint Petersburg: Krylov State Research Centre, 2024.
6. Daley C.G., Riska K. Conceptual Framework for an Ice Load Model. Report to National Energy Board, Calgary, Alberta, Canada. Ottawa / Espoo: Daley R&E / Helsinki University of Technology, 2000. 108 p.
7. Kujala P. Semi-empirical evaluation of long-term ice loads on a ship hull // Marine Structures. 1996. Vol. 9, No. 9. P. 849–871.
8. El Jaaba M. Structural resistance of polar ships to ice loading: Discussion of the IACS Polar rules considering different structural and methodological aspects. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology (NTNU), 2013. 158 p.
9. Daley C.G. Sea Ice Engineering: Theory and Application. Ottawa: Memorial University of Newfoundland, 2010.
10. Daley C.G. Ice Edge Contact: A Brittle Failure Process Model // Acta Polytechnica Scandinavica. Mechanical Engineering Series, No. 100. Helsinki: Finnish Academy of Technology, 1991.
11. Riska K. Ice edge failure process and modelling ice pressure. Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 376(2129), 2018.
12. Kärnä T. Finite ice failure depth in penetration of a vertical indenter into an ice edge // Annals of Glaciology. 1994. Vol. 19, P. 114–120.
13. Nakazawa N., Sodhi D.S. Ice Forces on Flat, Vertical Indenters Pushed Through Floating Ice Sheets // Special Report CRREL-SR-90-14. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1990.
14. Croasdale K.R., Morgenstern N.R., Nuttall J.B. Indentation tests to investigate ice pressures on vertical piers // Journal of Glaciology. 1977. Vol. 19, No. 81. P. 301–312.
15. Родионов А.А., Рябушкин С.В. Применение бессеточных процедур для численного моделирования взаимодействия конструкций с ледовой средой при различных размерах зоны контакта. Морские интеллектуальные технологии. 2025. №3, часть 2. С. 101-112.
16. Andryushin A.V., Ryabushkin S.V., Voronin A.Y., Shapkov E.V. Sharp Profile for Icebreaking Propellers to Improve Their Ice and Hydrodynamic Characteristics. J. Mar. Sci. Eng. 2022, 10, 742.
17. Kujala P. Modelling of the ice-edge failure process with curved failure surfaces // Proceedings of Annals of Glaciology 19, International Glaciological Society, Espoo, Finland, 1994.

18. Цуприк В.Г. Влияние угла скола в исследованиях удельной энергии механического разрушения морского льда // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2013.
19. Hellan K. Introduction to Fracture Mechanics, University of Trondheim, Norway; Publishing office Mir: Moscow, Russia, 1988.
20. Goodman D. Measurement of the critical stress intensity factor of polycrystalline ice at high loading rates. In Collection of Physics and Mechanics of Ice; Publishing House Mir: Moscow, Russia, 1983.
21. Zhang Y., Wang Q., Han D., Li J., Wang C. Investigation on the mixed mode fracture toughness of freshwater ice using the semi-circular bend method // Cold Regions Science and Technology. 2023. Vol. 205. Article 103718.
22. Xu Y., Zhou M., Yi X., Hua W., Huang J., Zhang W., Dong S. Experimental study on mixed-mode (I–II) fracture toughness of freshwater ice // Acta Mechanica Solida Sinica. 2024. Vol. 37. P. 252–264.
23. Weeks W.F. On Sea Ice; University of Alaska Press: Fairbanks, AK, USA, 2010.
24. Schulson E.M. Friction and Fracture of Ice. Ice Research Laboratory, Thayer School of Engineering, Dartmouth College, 2015.
25. Schulson E.M., Duval P. Creep and Fracture of Ice. Cambridge University Press, 2009.
26. Fish A.M., Zaretsky Y.K. Ice strength as a function of hydrostatic pressure and temperature. Hanover, NH: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1997. 36 p.
27. Jijian L. Uniaxial Compressive Strength and Fracture Mode of Lake Ice at Moderate Strain Rates Based on a Digital Speckle Correlation Method for Deformation Measurement. Appl. Sci. 2017, 7(5), 495.
28. Isakov M. et al. In-Situ Damage Evaluation of Pure Ice under High Rate Compressive Loading. Materials 2019, 12, 1236.
29. Qi J. Dynamic Compression Strength and Failure of Natural Lake Ice Under Moderate Strain Rates. Lat. Am. j. solids struct. 14 (9), 2017.
30. Song Z. Experimental investigation of dynamic shear mechanical properties and failure criterion of ice at high strain rates // International Journal of Impact Engineering. 2022. Vol. 166. Article 104254.
31. Kärnä T., Kamesaki K., Tsukuda H. A layered flaking model of ice-structure interaction // Proceedings of the 14th IAHR International Symposium on Ice. Potsdam: IAHR, 1998.
32. Родионов А.А., Рябушкин С.В. Использование бессеточных процедур для численного моделирования механического поведения льда в широком диапазоне внешних воздействий. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 3, часть 2, С. 83—94.
33. Choi Y.H., Choi H.Y., Lee C.S., Kim M.H., Lee J.M. Suggestion of a design load equation for ice-ship impacts // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2012. Vol. 4, P. 386–402.
34. Frederking R., Kubat I. Comparison of Local Ice Pressure and Line Load Distributions from Ships Studied in the SAFEICE Project. 10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures. Houston, Texas, USA, 2007.
35. Palmer A., Croasdale K. Arctic Offshore Engineering. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2013.

References

1. Andryushin A.V., Zuev P.S., Kuteinikov M.A., Grigor'yeva O.A., Bolshev A.S., Frolov S.A. Determination of ice loads acting on bow and stern of modern ice ships and icebreakers // Proceedings of the 26th International Ocean & Polar Engineering Conference (ISOPE-2016), Rhodes, Greece, June 2016.
2. Andryushin A., Zuev P., Kuteinikov M., Grigorjeva O., Bolshev A., Frolov S. Ice loads on the ships with hull forms differing from the regulated by RS Rules // Morskoi Vestnik, Special edition № 1 (13), 2017.
3. Riska K.A. Ship-Ice Interaction in Ship Design: Theory and Practice. Helsinki, Finland: ILS Oy; Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2006. 120 p.
4. Andryushin A.V., Zuev P.S., Voronin A.Y., Fedoseev S.S., Ryabushkin S.V., Kuteinikov M.A. Ensuring of the strength of large arctic LNG carriers and oil tankers for year-round transportation in the Arctic conditions. Proceedings of the Thirty-second International Ocean and Polar Engineering Conference, Shanghai, China, 2022.
5. Andryushin A.V., Voronin A.Yu., Ryabushkin S.V., Fedoseev S.S., Shapkov E.V. Hull and propulsion complex strength assurance of the large-capacity arctic ships. Proceedings of the 13th International Conference "Naval Fleet and Shipbuilding in Modern Conditions" (NSN'2024), Saint Petersburg: Krylov State Research Centre, 2024.
6. Daley C.G., Riska K. Conceptual Framework for an Ice Load Model. Report to National Energy Board, Calgary, Alberta, Canada. Ottawa / Espoo: Daley R&E / Helsinki University of Technology, 2000. 108 p.
7. Kujala P. Semi-empirical evaluation of long-term ice loads on a ship hull // Marine Structures. 1996. Vol. 9, No. 9. P. 849–871.
8. El Jaaba M. Structural resistance of polar ships to ice loading: Discussion of the IACS Polar rules considering different structural and methodological aspects. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology (NTNU), 2013. 158 p.
9. Daley C.G. Sea Ice Engineering: Theory and Application. Ottawa: Memorial University of Newfoundland, 2010.
10. Daley C.G. Ice Edge Contact: A Brittle Failure Process Model // Acta Polytechnica Scandinavica. Mechanical Engineering Series, No. 100. Helsinki: Finnish Academy of Technology, 1991.
11. Riska K. Ice edge failure process and modelling ice pressure. Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 376(2129), 2018.
12. Kärnä T. Finite ice failure depth in penetration of a vertical indenter into an ice edge // Annals of Glaciology. 1994. Vol. 19, P. 114–120.
13. Nakazawa N., Sodhi D.S. Ice Forces on Flat, Vertical Indenters Pushed Through Floating Ice Sheets // Special Report CRREL-SR-90-14. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1990.

14. Croasdale K.R., Morgenstern N.R., Nuttall J.B. Indentation tests to investigate ice pressures on vertical piers // Journal of Glaciology. 1977. Vol. 19, No. 81. P. 301–312.
15. Rodionov A.A., Ryabushkin S.V. Primenenie bessetochnyh procedur dlya chislennogo modelirovaniya vzaimodejstviya konstrukcij s ledovoj sredoj pri razlichnyh razmerah zony kontakta [Application of meshless procedures for numerical modeling of ice-structure interaction with varying contact area size]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2025. №3, chast'2, s. 101-112.
16. Andryushin A.V., Ryabushkin S.V., Voronin A.Y., Shapkov E.V. Sharp Profile for Icebreaking Propellers to Improve Their Ice and Hydrodynamic Characteristics. J. Mar. Sci. Eng. 2022, 10, 742.
17. Kujala P. Modelling of the ice-edge failure process with curved failure surfaces // Proceedings of Annals of Glaciology 19, International Glaciological Society, Espoo, Finland, 1994.
18. Tsuprik V.G. Vliyanie ugla skola v issledovaniyah udel'noj energii mekhanicheskogo razrusheniya morskogo l'da [The effect of splitting angle in studies of specific energy of mechanical fracture of sea ice] // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal), 2013.
19. Hellan K. Introduction to Fracture Mechanics, University of Trondheim, Norway; Publishing office Mir: Moscow, Russia, 1988.
20. Goodman D. Measurement of the critical stress intensity factor of polycrystalline ice at high loading rates. In Collection of Physics and Mechanics of Ice; Publishing House Mir: Moscow, Russia, 1983.
21. Zhang Y., Wang Q., Han D., Li J., Wang C. Investigation on the mixed mode fracture toughness of freshwater ice using the semi-circular bend method // Cold Regions Science and Technology. 2023. Vol. 205. Article 103718.
22. Xu Y., Zhou M., Yi X., Hua W., Huang J., Zhang W., Dong S. Experimental study on mixed-mode (I–II) fracture toughness of freshwater ice // Acta Mechanica Solida Sinica. 2024. Vol. 37. P. 252–264.
23. Weeks W.F. On Sea Ice; University of Alaska Press: Fairbanks, AK, USA, 2010.
24. Schulson E.M. Friction and Fracture of Ice. Ice Research Laboratory, Thayer School of Engineering, Dartmouth College, 2015.
25. Schulson E.M., Duval P. Creep and Fracture of Ice. Cambridge University Press, 2009.
26. Fish A.M., Zaretsky Y.K. Ice strength as a function of hydrostatic pressure and temperature. Hanover, NH: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1997. 36 p.
27. Jijian L. Uniaxial Compressive Strength and Fracture Mode of Lake Ice at Moderate Strain Rates Based on a Digital Speckle Correlation Method for Deformation Measurement. Appl. Sci. 2017, 7(5), 495.
28. Isakov M. et al. In-Situ Damage Evaluation of Pure Ice under High Rate Compressive Loading. Materials 2019, 12, 1236.
29. Qi J. Dynamic Compression Strength and Failure of Natural Lake Ice Under Moderate Strain Rates. Lat. Am. j. solids struct. 14 (9), 2017.
30. Song Z. Experimental investigation of dynamic shear mechanical properties and failure criterion of ice at high strain rates // International Journal of Impact Engineering. 2022. Vol. 166. Article 104254.
31. Kärnä T., Kamesaki K., Tsukuda H. A layered flaking model of ice-structure interaction // Proceedings of the 14th IAHR International Symposium on Ice. Potsdam: IAHR, 1998.
32. Rodionov A.A., Ryabushkin S.V. Ispol'zovanie bessetochnyh procedur dlya chislennogo modelirovaniya mekhanicheskogo povedeniya l'da v shirokom diapazone vneshnih vozdeystvij [Usage of meshless procedures to numerical simulate the mechanical behavior of ice in a wide range of external influences]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2024. № 3, chast' 2, s. 83-94.
33. Choi Y.H., Choi H.Y., Lee C.S., Kim M.H., Lee J.M. Suggestion of a design load equation for ice-ship impacts // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2012. Vol. 4, P. 386–402.
34. Frederking R., Kubat I. Comparison of Local Ice Pressure and Line Load Distributions from Ships Studied in the SAFEICE Project. 10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures. Houston, Texas, USA, 2007.
35. Palmer A., Croasdale K. Arctic Offshore Engineering. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2013.

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

Родионов Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры Строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 10, e-mail: rodionovsmk@yandex.ru

Aleksandr A. Rodionov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Ship Mechanics, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: rodionovsmk@yandex.ru

Рябушкин Сергей Владимирович, аспирант кафедры Строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 10, e-mail: serg.ryabuschkin@yandex.ru

Sergey V. Ryabushkin, graduate student, Department of Ship Mechanics, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: serg.ryabuschkin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.11.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.01.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 20.01.2026.

Научная статья

УДК 532.526.2.624.124

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.003>

Оценка ледовых качеств судов на воздушной подушке

Козин В.М.¹ kozinvictor@rambler.ru¹Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук

Аннотация. Перечислены ледотехнические задачи, при решении которых нетрадиционное использование амфибийных судов на воздушной подушке (СВП) для разрушения ледяного покрова резонансным методом оказывается целесообразно. К ним отнесены: разрушение ледяного покрова на мелководье, т.е. когда глубина акватории оказывается недоступной для ледоколов из-за их осадки; разрушение заторов и зажоров во время весенних ледоходов с целью предотвращения разрушительных наводнений; разрушение льда на больших площадях для вскрытия ледяного покрова водохранилищ и заливов рек с целью более раннего открытия навигации на внутренних водных путях и пр. На основании этого отмечается необходимость в оценке ледовых качеств СВП. Указаны особенности эксплуатации СВП в ледовых условиях. Предложены уточнения в определениях традиционных понятий ледовых качеств судов. Так, под предельной ледопроемностью для СВП предложено понимать его способность разрушать ледяной покров максимальной толщины за один проход при движении с резонансной скоростью, т.е. его ледоразрушающую способность. При этом в отличие от ледоколов и судов ледового плавания предельная ледопроемность СВП обеспечивается не только его водоизмещением (массой), мощностью силовой установки, давлением в воздушной подушке (ВП), но и проемностью судна над торосами определенной высоты, т.е. высотой гибкого ограждения (ГО), зависящей от габаритов судна. Приведена зависимость толщины разрушаемого льда от давления и площади ВП, определяющей ширину и соответствующие мореходные качества судна при его эксплуатации в качестве обычного транспортного средства в условиях чистой воды. Под ледовой ходкостью судов ледового плавания понимают их способность продвигаться во льдах с определенной скоростью. Поскольку у СВП она не зависит от толщины льда и определяется величинами аэродинамического сопротивления и сопротивления ГО, то под обеспечением ледовой ходкости СВП в работе предложено понимать не только возможность двигаться с резонансной скоростью, но и одновременное обеспечение проходимости ледяных торосов, т.е. способность судна преодолевать препятствия в виде торосов определенной высоты. Получена зависимость высоты преодолеваемых торосов от высоты ГО. Приведена диаграмма для определения скорости СВП при разрушении льда в различных ледовых условиях. Полученные зависимости позволяют оценивать такие ледовые качества СВП, как ледоразрушающая способность и проемность ледяных торосов.

Ключевые слова: Судно на воздушной подушке, ледяной покров, разрушение, резонансный метод, высоты гибкого ограждения и торосов.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Института машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН.

Для цитирования: Козин В.М. Оценка ледовых качеств судов на воздушной подушке. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 32—38. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.003.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.003>

Assessment of the ice-breaking capabilities of hovercrafts

Victor V. Kozin¹ kozinvictor@rambler.ru¹Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract. The list includes ice engineering tasks, in which the unconventional use of amphibious hovercraft (SVP) to destroy the ice cover using a resonant method is advisable. These include: breaking the ice cover in shallow waters, i.e., when the depth of the water area is not accessible to icebreakers due to their draft; breaking up ice jams and blocks during spring ice floes to prevent devastating floods; breaking up ice on large areas to open up the ice cover of reservoirs and river bays for earlier navigation on inland waterways, etc. Annotation. The list includes ice engineering tasks, in which the unconventional use of amphibious hovercraft (SVP) to destroy the ice cover using a resonant method is advisable. These include: breaking the ice cover in shallow waters, i.e., when the depth of the water area is not accessible to icebreakers due to their draft; breaking up ice jams and blocks during spring ice floes to prevent devastating floods; breaking up ice on large areas to open up the ice cover of reservoirs and river bays for earlier navigation on inland waterways, etc. Based on this, there is a need to assess the ice qualities of SVPs. The article describes the features of operating SVPs in ice conditions. It also proposes refinements to the definitions of traditional concepts related to the ice qualities of ships. For example, the article suggests that the maximum ice-breaking capacity of a SVP should be understood as its ability

to break through ice of maximum thickness in a single pass at a resonant speed, i.e., its ice-breaking capability. Unlike icebreakers and ice-class vessels, the maximum ice-breaking capacity of a SVP is determined not only by its displacement (mass), power of the power plant, pressure in the air cushion (AC), but also the vessel's ability to pass over ice floes of a certain height, i.e. the height of the flexible protection (FP), which depends on the vessel's dimensions. The article presents the dependence of the vessel's ice-breaking capacity on both the thickness of the ice being broken and the area of the air cushion, which determines the width and corresponding seaworthiness of the vessel when it is used as a conventional vehicle in clear water. The ice mobility of ice-going vessels refers to their ability to move through ice at a certain speed. Since the SVP does not depend on the thickness of the ice and is determined by the values of the aerodynamic resistance and resistance of GO, then under the ice mobility in the work it is proposed to consider the passability of ice hummocks, i.e. the ability of the vessel to overcome obstacles in the form of hummocks of a certain height. The dependence is given for determining the height of the hummocks overcome from the height of the GO. The diagram is given for determining the speed of the SVP when breaking the ice in various ice conditions. The obtained dependences allow to estimate such ice qualities of existing or newly designed SVP. as ice-breaking ability and passability of ice hummocks.

Keywords: Hovercraft, ice cover, destruction, resonance method, heights of flexible fencing and ice floes.

Financial Support: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Victor V. Kozin Assessment of the ice qualities of hovercrafts. Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 32—38. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.003.

Введение

Нетрадиционное использование амфибных судов на воздушной подушке (СВП) в качестве ледоразрушающего средства показало его перспективность в определенных ледовых условиях[1]. Необходимость в таком применении судов возникает в тех случаях, когда с помощью традиционных ледокольных средств затруднительно, малоэффективно, а иногда и невозможно решать ряд ледотехнических задач. К ним можно отнести: разрушение ледяного покрова на мелководье, т.е. когда глубина акватории оказывается недоступной для ледоколов из-за их осадки; разрушение заторов и зажоров во время весенних ледоходов с целью предотвращения разрушительных наводнений; разрушение льда на больших площадях (ледокол в сплошном ровном льду прокладывает канал шириной чуть больше ширины своего корпуса [2], а СВП за один проход способен разрушить полосу льда на значительно большей площади (рис. 1, 2) [3]) для вскрытия ледяного покрова водохранилищ и заливов рек с целью более раннего открытия навигации на внутренних водных путях и пр. В связи с этим встают задачи по определению возможностей СВП разрушать ледяной покров резонансным методом (РМРЛ)[1].



Рис. 1. Разрушение ледяного покрова после двух проходов СВП



Рис. 2. Разрушение льда на мелководье с выходом судна на остров

Поскольку СВП являются довольно дорогостоящим транспортным средством, то создавать их только для разрушения льда, т.е. кратковременного использования в периоды ледостава и ледохода, будет нерационально. Поэтому при эксплуатации СВП следует рассматривать возможность совмещения в этом виде транспортных средств грузопассажирских, специальных и ледокольных функций.

Особенности эксплуатации СВП в ледовых условиях

Эксплуатация амфибных СВП в ледовых условиях, в отличие от обычных, безусловно, имеет свои особенности, влияющие на их параметры. Несмотря на возможность использования обычных СВП в качестве ледоразрушающего средства для более успешной их эксплуатации к конструкциям и оборудованию вновь проектируемых судов предъявляют дополнительные требования. Для речных условий эти требования менее жесткие, чем для условий Арктики. Общими являются требования, предъявляемые к их конструкциям. Например: обеспечение возможности быстрой смены поврежденных пальцеобразных элементов гибкого ограждения (ГО) воздушной подушки (ВП); необходимое утолщение ее стенок из-за повышенного истирания вследствие трения льда; обеспечение запасов мощности энергетических установок и расходов топлива с учетом низких температур и режимов движения, близких к

швартовным и снижающим к.п.д. воздушных винтов; необходимое в целях обеспечения безопасности эксплуатации увеличение автономности; ухудшение аэродинамических качеств лопастей движительного и подъемного комплексов вследствие брызгообразования и последующего их обледенения при отрицательных температурах; конструкционные особенности для обеспечения подогрева ГО отработанными газами турбин в целях уменьшения его жесткости и обледенения и пр. [4,5]. Движение над затороженными участками ледяного покрова требует большей высоты ГО. Материал ГО наряду с известными требованиями [5] должен удовлетворять и таким, как сохранение эластичности, хорошей износостойкости и прочности при отрицательных температурах.

Более суровые условия Арктики и высокие скорости движения требуют установки на судах эффективной и точной системы обнаружения препятствий. Работа в паковом льду с большим количеством торосов требует улучшенной по сравнению с существующими судами маневренности. Большее количество маневров требует дополнительного расхода топлива. При работе в ледовых условиях СВП должны иметь повышенную тяговую мощность по сравнению с судами, работающими в условиях чистой воды. Как показывают исследования работы [6] на больших СВП, более чувствительных к массе механизмов, целесообразна установка газотурбинных двигателей. Поэтому, по-видимому, потребуется корректировка существующих уравнений масс, так как при работе в зимних условиях для жилых и служебных помещений необходимы большие площади. При этом особенности СВП, способных работать в ледовых условиях, не должны ограничивать область их использования в любой период навигации.

СВП нового типа, создаваемые для народного хозяйства, должны обладать высокими эксплуатационными качествами и надежностью в самых разнообразных природных и климатических условиях. Конструкция перспективных СВП путем несложной модификации основного варианта должна обеспечивать возможность их многоцелевого использования. Выполнение этого требования особенно важно для легких и средних СВП, предназначенных для использования в обширных малоосвоенных районах Севера и Северо-востока нашей страны со слаборазвитой дорожной сетью, где обычные виды транспорта, за исключением воздушного, практически применить нельзя. Для эксплуатации в малонаселенных районах северных широт, очевидно, наиболее удобны амфибийные СВП, представляющие по своему архитектурно-конструктивному типу суда-площадки. Грузовая палуба таких судов должна проектироваться с учетом горизонтального способа погрузки-выгрузки, что отвечает требованию перевозки грузов широкой номенклатуры: контейнеров; поддонов; пакетов; бочек; колесных и гусеничных машин; различного оборудования и т.д. При проектировании модульных корпусов СВП необходимо предусматривать и возможность создания на их базе несамходных лихтеров на воздушной подушке.

Предельная ледопроеходимость

Из известных понятий, определяющих ледовые качества судов, т.е. совокупность характеристик, которые определяют пригодность судна для плавания во льдах [7], в работе рассмотрена предельная ледопроеходимость (для судов ледового плавания под ней понимают предельную толщину сплошного ровного льда, которую может преодолеть судно, двигаясь с минимально устойчивой скоростью около 1,5–3 узлов при работе главной энергетической установки на полную мощность [2]). Под этим ледовым качеством для СВП будем понимать его способность разрушать ледяной покров максимальной толщины за один проход при движении с резонансной скоростью, т.е. его ледоразрушающую способность [1, 9]. При этом в отличие от ледоколов и судов ледового плавания предельная ледопроеходимость СВП обеспечивается не только его водоизмещением (массой), мощностью силовой установки, давлением в ВП, но и проходимостью судна над торосами определенной высоты, т.е. высотой ГО, зависящей от габаритов судна. Таким образом, встает задача определения зависимости ледоразрушающей способности судна не только от толщины разрушаемого льда, но и от площади ВП, определяющей ширину и соответствующие мореходные качества судна при

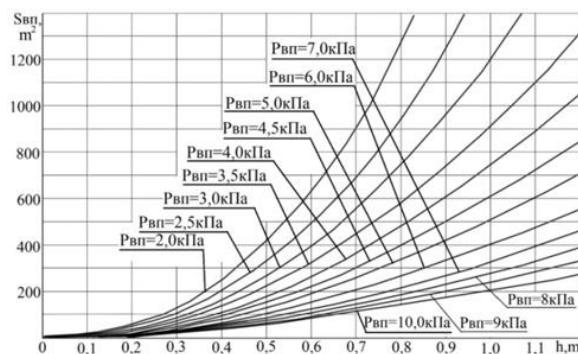


Рис. 3. Зависимость толщины разрушаемого льда от давления и площади ВП

его эксплуатации в качестве обычного транспортного средства в условиях чистой воды.

Из известных исследований следует, что для описания волновых колебаний льда при изгибно-гравитационном резонансе можно принять закон деформирования упруго-запаздывающей среды Кельвина-Фойгта [10]. Тогда дифференциальное уравнение вязко-упругих колебаний ледяного покрова при установившемся движении сосредоточенной силы P с постоянной скоростью v будет иметь вид:

$$\frac{Gh^3}{3} \left(1 + \tau_{\Phi} \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla^4 w + \rho_b g w + \rho_l h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \rho_b \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} =$$

$$= P \delta(x - vt, y - 0).$$

где: G – модуль упругости льда при сдвиге; h – толщина ледяного покрова; ∇ – дифференциальный оператор набла; τ_{Φ} – время релаксации деформаций; w – прогиб льда; ρ_b , ρ_l – плотность воды и льда; g – ускорение силы тяжести; Φ – потенциал движения жидкости,

удовлетворяющий уравнению Лапласа во всем объеме воды и условиям непроницаемости на дне бассейна; δ – дельта-функция Дирака; o, x, y, z – неподвижная система координат.

Решение уравнения (1) приведено в работе [11]. На его основании и выполненных экспериментов в опытовых бассейнах, на мелко – и крупномасштабных моделях, а также на натурных СВП [1] с учетом разработанного критерия полного разрушения ледяного покрова [9] с использованием оценки уровня теоретической плотности потенциальной энергии изгиба пластины [12], получена верифицированная зависимость массы

СВП G_c от максимальной толщины ледяного покрова, который способно полностью разрушить судно резонансным методом при заданном давлении в ВП за один проход, т.е. его предельная ледоразрушающая способность $G_c = f(h, P_{вп})$

[9]. Однако эту зависимость нельзя использовать для определения габаритов судна, т.е. его способности не только разрушать лед, но и одновременно преодолевать заторошенные участки ледяного покрова, поскольку ширина судна (ширина ВП), определяющая максимальную высоту его ГО [5], обеспечит ему проходимость над торосами заданной высоты. Для ее определения сделан переход от полученной зависимости к зависимости $S_{вп} = f(h, P_{вп})$, позволяющей вычислить ширину ВП, используя

очевидное равенство $G_c = S_{вп} P_{вп}$. Так как форма в плане и соотношение размеров ВП мало влияют на напряженно-деформированное состояние ледяного покрова [13] при реальных значениях у СВП $\lambda_{вп} = L_{вп}/B_{вп} = 1-3$ (где $L_{вп}$ – длина ВП) [5], то при определении $S_{вп}$ влияние удлинения корпуса судна $\lambda_{вп}$ не рассматривалось. Поскольку увеличение $P_{вп}$ свыше 10 кПа несущественно сказывается на величине разрушающей лед нагрузки G_c [9], то значения $S_{вп}$ рассчитывались при изменении $P_{вп}$ в пределах от 2 до 10 кПа, т.е. от минимального значения $P_{вп}$, характерного для существующих СВП, до $P_{вп}$, превышение которого практически не приводит к изменению ледоразрушающей способности судна. Результаты расчетов зависимости $S_{вп} = f(h, P_{вп})$ приведены на рис.3.

Ледовая ходкость

Поскольку СВП обладают амфибийными качествами, т.е. способностью двигаться над ледяным покровом любой толщины, то традиционное понятие ледовой ходкости, т.е. способности судна продвигаться во льдах с определенной скоростью [7], для СВП, в отличие от судов ледового плавания, она определяется величинами аэродинамического сопротивления, сопротивления ГО и проходимостью ледяных торосов, т.е. способностью судна преодолевать препятствия в виде торосов определенной высоты. Таким образом, ледовая ходкость СВП также зависит от высоты ГО судна, максимальная величина которой определяется шириной ВП, в свою очередь,



Рис.4. СВП «Скат» в ледовом «плёну»

зависящей от ее площади [5, 14]. При ее недостаточности судно может «зависнуть» на гребнях торосов и лишиться повышенного давления в ВП, т.е. попасть в ледовый «плён» (рис. 4). В результате, даже обладая достаточной ледоразрушающей способностью, оно не сможет разрушить всегда встречающийся с заторошенными участками ледяной покров даже незначительной толщины.

Высота ГО ($h_{го}$) обычных СВП, т.е. при движении в условиях чистой воды, назначается из условия обеспечения судну достаточной мореходности и задается в зависимости от высоты волн, на которую рассчитывается эксплуатация судна [5]. Вместе с тем, по требованию обеспечения поперечной остойчивости высота ГО должна удовлетворять условиям [6]:

$$h_{го} \leq 0,17 B_{вп} \quad (2)$$

В ледовых условиях встает задача по определению максимальной высоты торосов h_t , которые способно преодолевать СВП без риска повредить их ГО. Высота ГО для СВП, сочетающих ледокольные функции при разрушении ледяного покрова резонансным методом, должна также удовлетворять требованиям условиям (2), т.к. в летнее время эти суда должны использоваться для обычных транспортных целей. Тогда ширина ВП ледокольных СВП, способных разрушить ледяной покров при их массе G_c и заданном $P_{вп}$, определится так:

$$B_{вп} = S_{вп} / (\lambda_{вп} L_{вп}) \quad (3)$$

Опыт эксплуатации СВП в ледовых условиях показал, что на малых скоростях, близких к резонансным, суда могут преодолевать торосы высотой, не превышающей 75% общей высоты ГО [15], т.е. при выполнении соотношения:

$$h_{го} > 1.33 h_t \quad (4)$$

Тогда, учитывая зависимость (4) и условие обеспечения поперечной остойчивости (2), нетрудно установить связь между наибольшими

значениями $h_{го}$, h_t , h и $\lambda_{вп}$. Результаты расчетов этой зависимости для характерного диапазона изменения $\lambda_{вп}$ [5] и возможных давлений $P_{вп}$ у существующих и перспективных СВП [4, 6] представлены на рис.5. На этом же рисунке с учетом того, что $h_t^{max} = 0,75 h_{го}$, приведены максимальные значения высоты торосов, которые смогут преодолевать СВП.

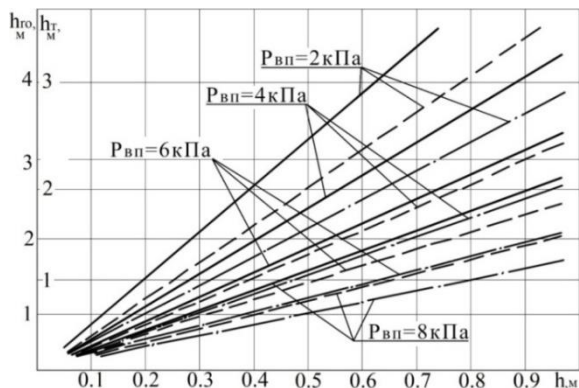


Рис. 5. Наибольшие значения высоты ГО и преодолеваемых судном торосов в зависимости от $\lambda_{вп}$, $P_{вп}$, h : — $\lambda_{вп}=1$; - - $\lambda_{вп}=2$; - · - $\lambda_{вп}=3$

Определение скорости СВП в ледовых условиях

Скорость СВП, движущегося в режиме разрушения сплошного ледяного покрова, должна равняться резонансной [1]. При такой скорости СВП в системе "лед-вода" возникает изгибно-гравитационный резонанс, приводящий к раскачиванию ледяного покрова до наибольшей амплитуды и его последующему разрушению с наименьшей затратой энергии, т.е. судно будет обладать наибольшей ледоразрушающей способностью. Для определения величины этой скорости v_p можно воспользоваться известными теоретическими зависимостями.

На основании теории волновых колебаний ледяного покрова [10] резонансные скорости движения нагрузки определяются по следующим зависимостям. Для мелкой воды, когда $th\lambda H \approx \lambda H$ или $KH \ll 1$ (где λ – длина волны, K – волновое число, H – глубина воды)

$$v_p = \sqrt{gH}, \quad (5)$$

т.е. скорость не зависит от характеристик ледяного покрова.

Если глубина воды велика, т.е. $th\lambda H \approx 1$ или $KH \gg 1$, то

$$v_p = 1,33(Dg^3 / \rho_B)^{1/8}. \quad (6)$$

где D – цилиндрическая жесткость ледяной пластины.

На рис.7 (правый верхний квадрант) приведен график для их определения.

Волновые колебания ледяного покрова, как и волнообразование от движения СВП по чистой воде, изучены с точки зрения их нежелательности. При реализации же РМРЛ необходимы режимы с наиболее интенсивным волнообразованием. Как показывает опыт эксплуатации СВП в условиях мелководья, при ускоренном движении наблюдается резкое увеличение волнового сопротивления судна. Поэтому при разрушении льда на акваториях с малой глубиной могут оказаться эффективными режимы движения с большими ускорениями. В условиях глубокой воды, где данный эффект имеет обратное действие, следует двигаться с малыми ускорениями. При выполнении работ по разрушению льда полезно будет и применение маневров, описанных в [1].

Если при осуществлении РМРЛ возникнет потребность в повторных проходах судна по льду для измельчения обломков льда и уменьшения его сплоченности, разрушения кромок льда (рис. 6) и пр, то скорость СВП должна быть иной, чем при движении по сплошному льду.



Рис. 6. Разрушение кромок ледяного покрова

Разрушение льда или появление во льду множества сквозных трещин после первого прохода судна приводит к тому, что лед практически перестает влиять на закономерности формирования волн от движения СВП, т.е. ледяной покров с такой системой трещин ведет себя как битый лед. Как показывают экспериментально-теоретические исследования [1,10], наличие битого льда на поверхности воды незначительно влияет на такие параметры гравитационных волн, возбуждаемых судном, как длина и скорость их распространения [16]. Поэтому для того, чтобы судно испытывало наибольшее волновое сопротивление, оно должно двигаться со скоростью, соответствующей максимальному "горбу" сопротивления на чистой воде. На основе обработки данных работ [6,14,17] получен график для определения таких скоростей (рис.7).

Максимальное значение волнового сопротивления на мелководье в 2-2,5 раза выше, чем на глубокой воде [17]. Поэтому повторные проходы судна в условиях мелкой воды будут более эффективны, чем на глубокой.

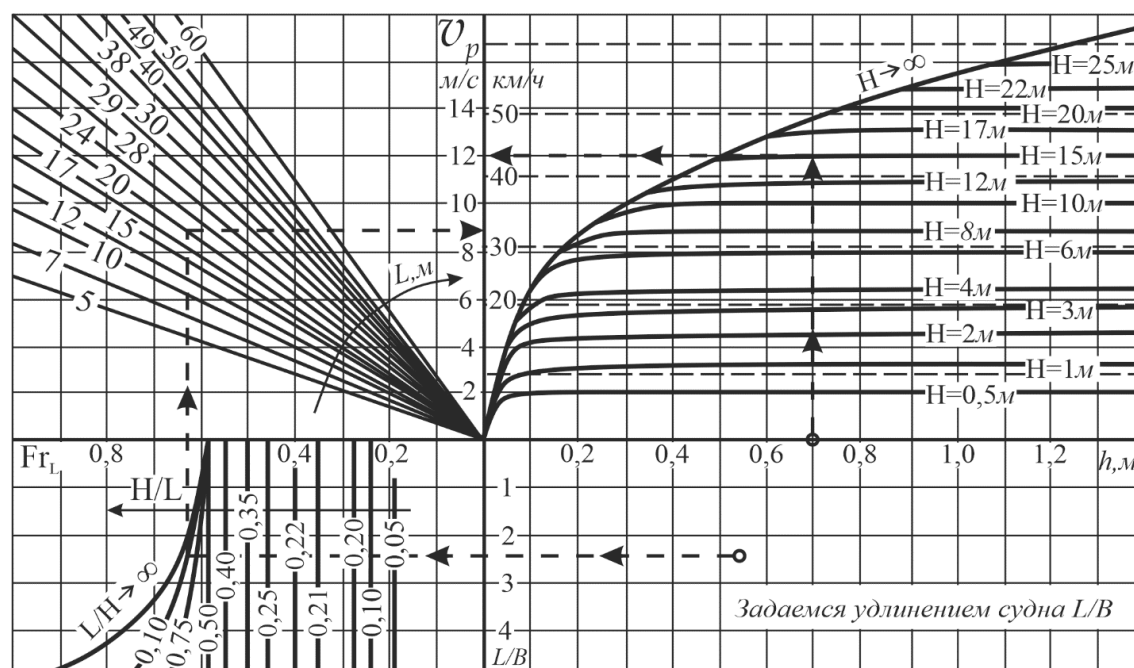


Рис. 7. Диаграмма для определения скоростей СВП (стрелками указано: ----- для сплошного льда; - - - для битого льда или чистой воды)

Заключение

Полученные зависимости можно использовать при решении задач по определению таких ледовых качеств существующих или вновь проектируемых СВП, как ледоразрушающая способность и проходимость ледяных торосов. Они позволяют

оценить возможность использования судов с заданными параметрами для разрушения ледяного покрова резонансным методом с учетом его заторможенности, а также определить их скорость движения в различных ледовых условиях.

Литература

1. Козин В.М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова. Изобретения и эксперименты. М.: Академия Естествознания. 2007. 355 с. ISBN 978-5-91327-017-7.
2. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. СПб.: Судостроение. 2013. 504 с. ISBN 5-7355-0779-6
3. Избранные задачи ледотехники. Средства и методы решения / В.М. Козин [и др.]; Нижегород. гос. тех. ун-т им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород. 2023. 772 с. ISBN 978-5-502-01733-6
4. Зуев В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях. Л.: Судостроение. 1986. 208 с.
5. Демешко Г.Ф. Проектирование судов. Амфибийные СВП: Учебник. В 2-х кн. Кн. 2. СПб: Судостроение. 1992. 329 с. ISBN 5-7355-0477-0
6. Колызаев Б.А., Косоруков А.И., Литвиненко В.А. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания. Л.: Судостроение, 1980. 472 с.
7. https://yandex.ru/search/?text=%D0%BB%D0%B5%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5+%D0%BA%D0%B0%D1%87%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0&lr=11453&clid=2871230&win=651&src=suggest_Pers (Дата обращения 24.11.2025).
8. <https://yandex.ru/search/?text=%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F+%D0%BB%D0%B5%D0%B4%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%85%D0%BB%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C+%D1%81%D1%83%D0%B4%D0%BD%D0%B0&clid=2871230&win=651&lr=11453> (Дата обращения 25.12.2025).
9. Козин В.М. Результаты экспериментально-теоретических исследований возможностей резонансного метода разрушения ледяного покрова. Известия РАН. МТТ. 2023, № 3. с. 3-20.
10. Хейсин Д.Е. Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеиздат. 1967. 216 с.
11. Козин В.М. Зависимость параметров судов на воздушной подушке, разрушающих ледяной покров резонансным методом, от ледовой обстановки. Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 1, С. 64—68. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.029
12. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. М.: Издательство физико-математической литературы. 1963. 653 с.
13. Козин В.М. Влияние формы поперечной нагрузки на напряженно-деформированное состояние ледяного покрова. Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. Вып. 83. С. 102—110.

14. Основы теории судов на воздушной подушке / Ю.Ю.Бенуа, В. К. Дьяченко, Б.А. Колызаев и др. Л.: Судостроение, 1970. 454 с.
15. Kordenbrock Fames H., Harry Charles W. The Arctic Surface Effect Vehicle Program. Nav. Eng. J., 1976, n. 2, p. 70-78.
16. Козин В.М. Зависимость параметров волн в битом льду от его сплоченности в условиях мелководья. Морские интеллектуальные технологии. С.-Петербург. 2020, № 2 том 1. С. 16-20.
17. Злобин Г.П., Симонов Ю.А. Суда на воздушной подушке. Л.: Судостроение, 1971. 212 с.

References

1. Kozin V.M. Resonant method of breaking the ice cover. Inventions and experiments. M.: Academy of Natural Sciences. 2007. 355 p. ISBN 978-5-91327-017-7.
2. Ionov B.P., Gramuzov E.M. Ice mobility of vessels. St. Petersburg: Shipbuilding. 2013. 504 p. ISBN 5-7355-0779-6
3. Selected tasks of ice engineering. Means and methods of solution / V.M. Kozin [et al.]; Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseev University. Nizhny Novgorod. 2023. 772 p. ISBN 978-5-502-01733-6
4. Zuev V.A. Means of prolonging navigation on inland waterways. L.: Sudostroenie. 1986. 208 p.
5. Demeshko G.F. Design of vessels. Amphibious SVP: Textbook. In 2 books. Book 2. SPb: Sudostroenie. 1992. 329 p. ISBN 5-7355-0477-0
6. Kolyzaev B.A., Kosorukov A.I., Litvinenko V.A. Handbook on the Design of Ships with Dynamic Maintaining Principles. L.: Sudostroenie, 1980. 472 p.
7. [https://yandex.ru/search/?text=%D0%BB%D0%B5%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5+%D0%BA%D0%B0%D1%87%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0&lr=11453&clid=2871230&win=651&src=suggest_Pers\(Accessed 11/24/2025\)](https://yandex.ru/search/?text=%D0%BB%D0%B5%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5+%D0%BA%D0%B0%D1%87%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0&lr=11453&clid=2871230&win=651&src=suggest_Pers(Accessed 11/24/2025)).
8. [https://yandex.ru/search/?text=%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F+%D0%BB%D0%B5%D0%B4%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%85%D0%BB%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C+%D1%81%D1%83%D0%B4%D0%BD%D0%B0&clid=2871230&win=651&lr=11453\(Accessed 12/25/2025\)](https://yandex.ru/search/?text=%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F+%D0%BB%D0%B5%D0%B4%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%85%D0%BB%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C+%D1%81%D1%83%D0%B4%D0%BD%D0%B0&clid=2871230&win=651&lr=11453(Accessed 12/25/2025)).
9. Kozin V.M. Results of experimental and theoretical studies of the possibilities of the resonance method for breaking the ice cover // Izv. RAS.MTT. 2023, No. 3. pp. 3-20.
10. Kheysin D.E. Dynamics of the Ice Cover. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967. 216 p.
11. Kozin V.M. Dependence of the parameters of hovercrafts that break the ice cover using the resonance method on the ice conditions. Marine Intelligent Technologies. 2025. No. 4 part 1, pp. 64—68. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.029
12. Timoshenko S.P., Voynovsky-Krieger S. Plates and Shells. Moscow: Publishing House of Physical and Mathematical Literature. 1963. 653 p.
13. Kozin V.M. Influence of the shape of the lateral load on the stress-strain state of the ice cover. Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and Mechanics. 2023. Issue 83. Pp. 102–110.
14. Fundamentals of the theory of hovercraft / Yu.Yu. Benua, V.K. Dyachenko, B.A. Kolyzaev, etc. L.: Sudostroenie, 1970. 454 p.
15. Kordenbrock Fames H., Harry Charles W. The Arctic Surface Effect Vehicle Program. Nav. Eng. J., 1976, n. 2, p. 70-78.
16. Kozin V.M. Dependence of wave parameters in broken ice on its cohesion in shallow water. Marine Intelligent Technologies. St. Petersburg. 2020, No. 2, vol. 1, pp. 16-20.
17. Zlobin, G.P., and Simonov, Yu.A. Hovercrafts. Leningrad: Sudostroenie, 1971. 212 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

Козин Виктор Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор по кафедре кораблестроения, главный научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, 681005, Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов 1, e-mail: kozinvictor@rambler.ru

Viktor M. Kozin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Shipbuilding Department, Chief Researcher of the Laboratory of Problems of Creation and Processing of Materials and Products, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 681005, Komsomolsk-on-Amur, 1 Metallurgov st., e-mail: kozinvictor@rambler.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.01.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.02.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 14.02.2026.

Научная статья

УДК 629.5.02: 624.042.43

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.035>

Укрупненная оценка ледовых качеств при обосновании ледового класса и направления совершенствования технологий экспериментальных исследований ледовой ходкости крупнотоннажных арктических судов

Апполонов Е.М.¹ em_appolonov@cdb-lazurit.ru, Петров А.С.¹ as_petrov@spb-lazurit.ru,
Черноморец А.Л.¹ al_chernomorets@spb-lazurit.ru, Юхнин А.В.¹ av_yukhnin@cdb-lazurit.ru

¹Центральное конструкторское бюро «Лазурит» г. Нижний Новгород

Аннотация. В докладе рассматриваются вопросы оценки ледовых качеств крупнотоннажных арктических судов (КАС), возникающие при определении оптимального ледового класса, и направления совершенствования технологий экспериментальных исследований ледовой ходкости КАС в сложных ледовых условиях. 1. Разработан способ выполнения укрупненной расчетной оценки ледовых качеств КАС. Расчетная оценка базируется на научной методологии, заложенной в требования действующих Правил РС в части ледовой классификации и ледовой прочности, а также данных о ледовой ходкости КАС. В результате расчетной оценки для заданного ледового класса КАС определяются технико-эксплуатационные характеристики ледовых качеств: продолжительности самостоятельного плавания в ледовых условиях, плавания под проводкой ледокола, запрета ледовой эксплуатации. Представлены результаты расчетной оценки, демонстрирующие динамику изменения технико-эксплуатационных характеристик КАС для эксплуатационных периодов зимне-весенней и полной годовой навигаций при повышении ледового класса от Arc5 до Arc7. Полученные результаты могут использоваться в качестве исходных данных при выполнении сравнительного технико-экономического анализа (ТЭА) по определению оптимального ледового класса КАС, предназначенного для вывоза углеводородного сырья (УВС) по Северному морскому пути. 2. Выполнены анализ и обобщение комплексных расчетно-экспериментальных исследований ледовой ходкости крупнотоннажного арктического танкера в сложных ледовых условиях – при самостоятельном плавании в крупнобитых сплоченных льдах и при плавании в канале за ледоколом, проложенном в торосистых льдах. По результатам анализа определены направления дальнейшего совершенствования технологий модельных ледовых испытаний, нацеленные на усиление роли расчетно-экспериментальных исследований ледовой ходкости при решении задач планирования ледовой эксплуатации и ледокольной поддержки судоходными компаниями – операторами КАС.

Ключевые слова: ледовые условия, ледовые испытания, ледовая ходкость, ледовая прочность.

Благодарности: авторы выражают благодарность Александру Владиславовичу Андрюшину и Кириллу Евгеньевичу Сазонову за консультативную поддержку по вопросам ледовой ходкости арктических судов.

Финансирование: исследование выполнено в инициативном порядке.

Для цитирования: Апполонов Е.М., Петров А.С., Черноморец А.Л., Юхнин А.В. Укрупненная оценка ледовых качеств при обосновании ледового класса и направления совершенствования технологий экспериментальных исследований ледовой ходкости крупнотоннажных арктических судов. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 39–52. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.035.

Original article

UDC 629.5.02: 624.042.43

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.035>

High-Level Assessment of Ice Performance when Substantiating the Ice Class and Trends of Improving the Technologies to Conduct Experimental Studies of Large-Capacity Arctic Vessels Navigation in Ice Conditions

Evgeniy M. Appolonov¹ em_appolonov@cdb-lazurit.ru, Anatoliy S. Petrov¹ as_petrov@spb-lazurit.ru,
Andrey L. Chernomorets¹ al_chernomorets@spb-lazurit.ru, Alexey V. Yukhnin¹ av_yukhnin@cdb-lazurit.ru

¹Lazurit Central Design Bureau, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. The paper addresses the issues of assessing the ice performance of large-capacity Arctic vessels (LAV) that arise when determining the optimal ice class, and ways of improving the technologies to conduct experimental studies of the vessels' navigation in severe ice conditions. 1. A method for performing the high-level calculation-based assessment (estimate) of the LAV ice performance has been developed. The assessment is based on the scientific methodology originated from the requirements of the current RS Rules in part of ice classification and ice strength, as well as data on the LAV ice performance. As a result of the assessment for the given LAV ice class, the service characteristics of ice performance, such as duration of independent navigation in ice, navigation when escorted by an icebreaker, prohibitions of operation in ice conditions are determined. The assessment results that demonstrate the dynamics of changes in the LAV service characteristics for the winter-spring and year-round navigation when the ice class is upgraded from Arc5 to Arc7 are presented. The derived results can be used as input data when performing a trade-off technical & economic analysis (TEA) to determine the optimal ice class of the LAV intended for the export of raw hydrocarbons (RH) along the Northern Sea Route. 2. Analysis and summary of the comprehensive computational

& experimental studies of ice performance of the large-capacity Arctic tanker in severe ice conditions during independent navigation in patch close floating ice and during navigation in a channel in hummock ice behind an icebreaker have been performed. Based upon the analysis results, trends of further improvement of model ice testing technologies aimed at enhancing the role of computational & experimental studies of ice performance when addressing the problems of planning operation in ice and icebreaker support by LAV-operating shipping companies are determined.

Keywords: Ice conditions, Ice tests, Ice performance, Ice strength

Acknowledgments: The authors express their gratitude to Dr. Alexander V. Andryushin and Dr. Kirill E. Sazonov for consultancy support on the matters of arctic vessels' ice performance.

Financial Support: The research was conducted in a proactive manner.

For citation: Evgeniy M. Appolonov, Anatoliy S. Petrov, Andrey L. Chernomorets, Alexey V. Yukhnin. High-Level Assessment of Ice Performance when Substantiating the Ice Class and Trends of Improving the Technologies to Conduct Experimental Studies of Large-Capacity Arctic Vessels' Navigation in Ice Conditions. Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 39—52. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.035.

Введение

1. Укрупненные расчетные оценки технико-эксплуатационных характеристик ледовых качеств при обосновании ледового класса КАС

1.1. Общий подход к определению оптимального ледового класса

Определение ледового класса, как правило, осуществляется на стадии проработки концепции судна ледового плавания. В общем случае задача определения ледового класса решается на основании сравнительного технико-экономического анализа (ТЭА). В качестве критерия оптимальности, как правило, принимается минимум суммарных капитальных и эксплуатационных затрат.

Процедура расчета капитальных затрат для заданного ледового класса в целом понятна и выполняется проектантом судна или привлекаемой заказчиком судна компетентной организацией. При вариации ледового класса от нижней (Arc5) до верхней (Arc7) границы рассматриваемого диапазона будет иметь место увеличение капитальных затрат.

Для расчета эксплуатационных затрат, особенно на ранней стадии проектирования, когда требуется получение укрупненных оценок на основании упрощенных расчетных процедур, необходима дополнительная проработка подходов к формированию исходных данных для дальнейшего экономического анализа.

Крупнотоннажные арктические суда (КАС) предназначаются для вывоза углеводородного сырья (УВС) с месторождений, расположенных на на российском арктическом шельфе. Поскольку моря восточного сектора российской Арктики характеризуются значительно более тяжелыми ледовыми условиями по сравнению с западным сектором, отдельно рассматриваются маршруты движения КАС в западном (Карское и Баренцево моря) и восточном (море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское моря) направлениях.

При эксплуатации на заданном маршруте в зависимости от тяжести ледовых условий КАС могут находиться в следующих эксплуатационных режимах (состояниях) [1]:

- самостоятельном плавании в ледовых условиях (СП);
- плавании под проводкой ледокола (ПЛ);
- ледовой эксплуатации (ЛЭ), включающей СП и ПЛ;

- простое вследствие запрета ледовой эксплуатации (ЗЭ).

Режим СП является наиболее эффективным с позиций эксплуатационных затрат. Необходимость использования ледокольной проводки и простой вследствие ЗЭ увеличивают эксплуатационные затраты. При повышении ледового класса от Arc5 до Arc7 будет иметь место увеличение доли СП, снижение долей ПЛ и ЗЭ и, соответственно, уровня эксплуатационных расходов.

Продолжительности перечисленных состояний в течение рассматриваемого эксплуатационного периода могут рассматриваться как технико-эксплуатационные характеристики ледовых качеств КАС и использоваться в качестве исходных данных при расчете эксплуатационных затрат.

Выполнение ТЭА, учитывающего возрастание капитальных затрат и снижение эксплуатационных затрат при повышении ледового класса от Arc5 до Arc7, позволяет определить оптимальный ледовый класс, соответствующий минимуму суммарных затрат за полный жизненный цикл судна.

Поскольку опыт арктической эксплуатации КАС весьма ограничен, возрастает роль расчетной оценки технико-эксплуатационных характеристик ледовых качеств КАС.

Способ выполнения укрупненной расчетной оценки для применения на ранних стадиях проектирования КАС представлен в настоящей статье.

1.2. Техничко-эксплуатационные характеристики ледовых качеств при определении оптимального ледового класса

Согласно изложенному в п. 1, при выполнении сравнительного ТЭА для определения оптимального ледового класса в качестве исходных данных должны рассматриваться следующие характеристики ледовых качеств КАС:

- продолжительность самостоятельного плавания в ледовых условиях (ТСП);
- продолжительность плавания под проводкой ледокола (ТПЛ);
- продолжительность ледовой эксплуатации (ТЛЭ), равная сумме продолжительностей СП и ПЛ: $ТЛЭ = ТСП + ТПЛ$; (1.2.1)
- продолжительность запрета ледовой эксплуатации (ТЗЭ).

Перечисленные продолжительности привязываются к конкретным используемым на практике эксплуатационным периодам:

- зимне-весенней навигации (ЗВН);

- летне-осенней навигации (ЛОН);
- полной годовой навигации (ПГН).

Введем:

$j=1,2$ – индекс направления вывоза УВС ($j=1$ – западное, $j=2$ – восточное);

$k=0,1,2$ – индекс эксплуатационного периода ($k=0$ – ПГН, $k=1$ – ЗВН, $k=2$ – ЛОН);

$c=5,6,7$ – индекс ледового класса ($c=5$ – Arc5, $c=6$ – Arc6, $c=7$ – Arc7);

N_k – продолжительности эксплуатационных периодов ($N_0=12$ месяцев – ПГН ($k=0$), $N_1=6$ месяцев – ЗВН ($k=1$), $N_2=6$ месяцев – ЛОН ($k=2$));

$ТСП_{jkc}$, $ТПЛ_{jkc}$, $ТЛЭ_{jkc}$, $ТЗЭ_{jkc}$ – абсолютные продолжительности СП, ПЛ, ЛЭ, ЗЭ в направлении j , в эксплуатационный период k для ледового класса c , месяцы;

$ТСП^0_{jkc}$, $ТПЛ^0_{jkc}$, $ТЛЭ^0_{jkc}$, $ТЗЭ^0_{jkc}$ – относительные (по отношению к продолжительности эксплуатационного периода N_k) продолжительности СП, ПЛ, ЛЭ, ЗЭ в эксплуатационный период k , в направлении j для ледового класса c ;

$ТСП^{0\%}_{jkc}$, $ТПЛ^{0\%}_{jkc}$, $ТЛЭ^{0\%}_{jkc}$, $ТЗЭ^{0\%}_{jkc}$ – относительные (в процентах) (по отношению к продолжительности эксплуатационного периода N_k) продолжительности СП, ПЛ, ЛЭ, ЗЭ в эксплуатационный период k , в направлении j для ледового класса c , %.

Величины введенных продолжительностей для рассматриваемого направления вывоза УВС изменяются с изменением ледового класса, при этом выполняется равенство

$$N_k = ТСП_{jkc} + ТПЛ_{jkc} + ТЗЭ_{jkc} = ТЛЭ_{jkc} + ТЗЭ_{jkc} \quad (1.2.2)$$

Ниже излагаются методические основы и результаты выполнения расчетной оценки продолжительностей ТСП, ТПЛ, ТЛЭ, ТЗЭ, характеризующих ледовые качества судна, на ранней стадии проектирования.

1.3. Методические основы расчетной оценки характеристик ледовых качеств

1.3.1 Основные положения методологии Правил РС

Расчетная оценка выполняется на основании научной методологии, заложенной в требования действующих Правил РС в части ледовой классификации и ледовой прочности и последовательно изложенной в [2].

Согласно данной методологии:

1.3.1.1. Каждому ледовому классу c ставится в соответствие базовый допустимый режим движения (БДРД) $V_c(H)$, определяющий допустимую скорость движения судна V_i в зависимости от толщины льда H , при которой воздействие льда на корпус не сопровождается появлением ледовых повреждений (остаточных пластических деформаций) в конструкциях [3,4]. Система БДРД $V_c(H)$ для условий зимне-весенних и летне-осенних навигаций представлены на рисунке 1.3.1.1 и 1.3.1.2.

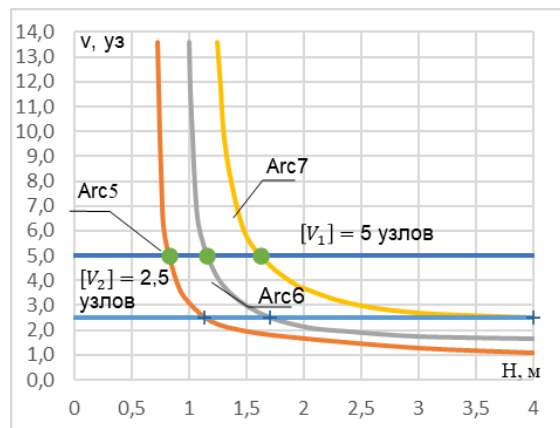


Рис. 1.3.1.1. Допустимые режимы движения судов арктических ледовых категорий в зимне-весеннюю навигацию по условиям ледовой неповреждаемости

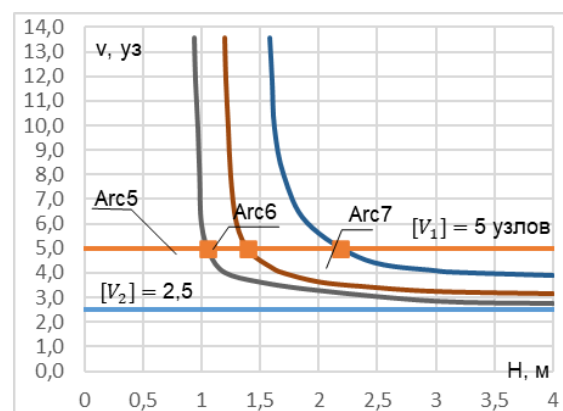


Рис. 1.3.1.2. Допустимые режимы движения судов арктических ледовых категорий в летне-осеннюю навигацию по условиям ледовой неповреждаемости

1.3.1.2. Для пяти российских арктических морей, расположенных по СМП [5,6], задаются законы распределения толщин льда $P_{mk}(H)$, где m – индекс моря (аналогичен введенному выше индексу j – индекс направления вывоза УВС ($j=1$ – западное, $j=2$ – восточное), $k=1,2$ – индекс эксплуатационного периода ($k=1$ – ЗВН, $k=2$ – ЛОН), P_{mk} – вероятность существования льда толщиной H в море m в эксплуатационный период k [7]. Закон распределения толщин льда для Баренцева моря представлен на рисунке 1.3.1.3.

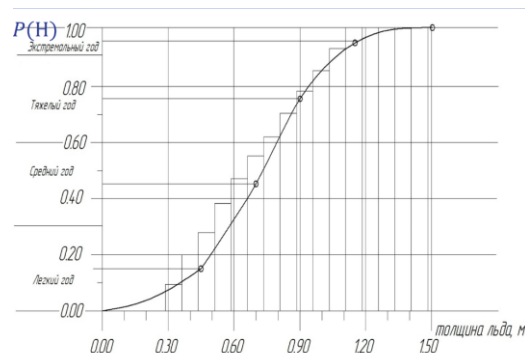


Рис. 1.3.1.3 Гистограмма и функция распределения толщин льда на севере Баренцева

1.3.1.3. Вводится 10-летний цикл, включающий 4 типа навигации: легкая, средняя и тяжелая с вероятностью реализации 30 % (раз в 3 года каждая), а также экстремальная с вероятностью 10 % (раз в 10 лет). Таким образом, в течение 10-летнего цикла реализуются по 3 легкие, по 3 средние, по 3 тяжелые навигации и одна экстремальная. Средние толщины

льда для легкой, средней, тяжелой и экстремальной навигаций с вероятностями соответственно 15 % (легкая), 45 % (средняя), 75 % (тяжелая), 95 % (экстремальная) для зимне-весенней и летне-осенней навигации представлены в таблице 1.3.1.1 отдельно для южной и северной частей каждого из морей.

Таблица 1.3.1.1.

Толщины льда (м) в арктических морях при различных типах навигации

Море	Район	Толщина льда и тип навигации							
		Зимне-весенний период				Летне-осенний период			
		Л	С	Т	Э	Л	С	Т	Э
Баренцево	Север	0,45	0,7	0,9	1,17	0,23	0,35	0,45	0,59
	Юг	0,32	0,55	0,72	1,1	–	–	–	–
Карское	Север	0,75	1,25	1,75	2,35	0,38	0,63	0,88	1,18
	Юг	0,45	1,0	1,7	2,2	0,23	0,5	0,85	1,1
Лаптевых	Север	1,0	1,9	2,8	4,0	0,5	0,95	1,4	2,0
	Юг	0,65	1,5	2,25	3,7	0,33	0,75	1,15	1,85
Восточно-Сибирское	Север	1,0	1,7	2,4	3,2	0,5	0,35	1,2	1,6
	Юг	0,6	1,34	1,9	2,95	0,3	0,67	0,95	1,5
Чукотское	Север	0,85	1,5	2,5	3,75	0,43	0,75	1,25	1,88
	Юг	0,5	1,18	2,0	3,45	0,25	0,6	1,0	1,73

Далее для трасс СМП будет использоваться информация для южных частей морей.

На основании данных таблицы 1.3.1.1 построены упрощенные (кусочно-линейные) законы распределения толщин льда для двух вариантов вывоза УВС – в западном и восточном направлениях. При этом на каждом направлении (j) значения толщин льда H_{jki} принимаются максимальными для соответствующей групп западных или восточных морей: для западных – по Карскому морю, для восточных – по морю Лаптевых:

$$P_{jk}^{УПР} = P_{jk}^{УПР}(H), \quad (1.3.1.1)$$

где

j – индекс направления вывоза УВС (j=1 – западное, j=2 – восточное);

k – индекс эксплуатационного периода (k=1 – ЗВН, k=2 – ЛОН);

$P_{jk}^{УПР}$ – вероятность существования льда толщиной H в морях направления j в эксплуатационный период k.

Кусочно-линейная функция $P_{jk}^{УПР}(H)$ строится для каждого сочетания направления вывоза УВС (j) и периода навигации (k) и проходит через 4 узловые точки, соответствующие 4-м типам навигации (индекс i) с вероятностями 15 % (легкая, i=1), 45 % (средняя i=2), 75 % (тяжелая i=3), 95 % (экстремальная i=4) и отвечающими им толщинами льда H_{jki} .

Построенные изложенным образом упрощенные (кусочно-линейные) законы распределения толщин льда представлены на рисунке 1.3.1.4, а использованные при их построении узловые точки H_{jki} – в таблице 1.3.1.2. Данные рисунка 1.3.1.4 и таблицы 1.3.1.2 будут использоваться в настоящей расчетной оценке.

Таблица 1.3.1.2.

Узловые точки упрощенных (кусочно-линейных) законов распределения толщин льда H_{jki}

Направление вывоза УВС (j)	Толщины льда в узловых точках H_{jki} , м							
	k=1, зимне-весенняя навигация (ЗВН)				k=2, Летне-осенняя навигация (ЛОН)			
	15 % (i=1, Л)	45 % (i=2, С)	75 % (i=3, Т)	95 % (i=4, Э)	15 % (i=1, Л)	45 % (i=2, С)	75 % (i=3, Т)	95 % (i=4, Э)
j=1, западное (по Карскому морю)	0,75	1,25	1,75	2,35	0,38	0,63	0,88	1,18
	0,45	1,0	1,7	2,2	0,23	0,5	0,85	1,1
j=2, восточное (по морю Лаптевых)	1,0	1,9	2,8	4,0	0,5	0,95	1,4	2,0
	0,65	1,5	2,25	3,7	0,33	0,75	1,15	1,85

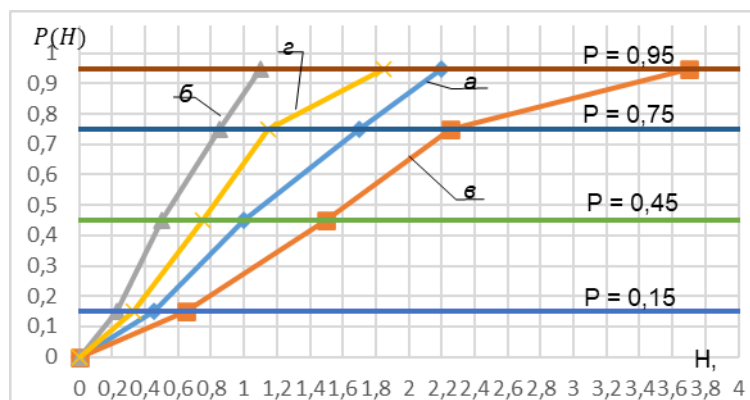


Рис 1.3.1.4. Упрощенные (кусочно-линейные) законы распределения толщин льда
а – западное направление, ЗВН; б – западное направление, ЛОН; в – восточное направление, ЗВН;
г – восточное направление, ЛОН

1.3.1.4. Допустимые условия ледового плавания в арктических морях устанавливаются на основании следующих положений.

Допустимые условия ледового плавания определяются для каждого арктического ледового класса (индекс с) с помощью базовых допустимых режимов движения $V_c(H)$ (см. рис. 1.3.1.1, 1.3.1.2). Допустимость плавания судна во льдах толщиной H устанавливается на основании сравнения скоростей V_c с нормативными скоростями $[V_n]$, определяемыми в зависимости от тактики ледового плавания (индекс n).

При самостоятельном плавании ($n=1$) в определенных ситуациях (например, при преодолении ледовых перемычек, торосистых участков и т. п.) судно должно иметь возможность развивать нормативную скорость $[V_1]$ для разрушения льда за счет собственной инерции, не получая при этом ледовых повреждений. При плавании под проводкой ледокола ($n=2$) неповреждаемость корпуса должна быть обеспечена при скоростях $[V_2]$, отвечающих нижней границе скорости плавания судна в канале по условию сохранения устойчивого движения. На основании опыта эксплуатации судов могут рассматриваться следующие диапазоны значений для нормативных скоростей:

$$[V_1] = 5 - 6 \text{ уз}, \quad (1.3.1.2)$$

$$[V_2] = 2 - 3 \text{ уз}. \quad (1.3.1.3)$$

В рамках научной методологии Правил РС в качестве нормативных значений допустимых скоростей приняты:

$$[V_1] = 6 \text{ уз}, \quad [V_2] = 3 \text{ уз}. \quad (1.3.1.4)$$

Превышение допустимой скорости V_c нормативного значения соответствует условиям безопасной эксплуатации во льдах толщиной H . Попадание V_c в диапазон скоростей $([V_n]-1)$, где $[V_n]$ – в узлах, может обоснованно связываться с повышенным риском получения повреждений. Область значений V ниже границы $([V_n]-1)$ однозначно определяет недопустимые районы плавания.

С учетом изложенных соображений критерий определения допустимых по условиям безопасности районов плавания устанавливается в следующем виде:

$V_c \geq [V_n]$ – эксплуатация разрешена;

$[V_n] > V_c > ([V_n]-1)$ – эксплуатация связана с повышенным риском; (1.3.1.5)

$V_c \leq ([V_n]-1)$ – эксплуатация запрещена,

где V_c , $[V_n]$ – допустимая и нормативная скорости, уз; $n=1$ – самостоятельное плавание; $n=2$ – проводка ледоколом.

Следует подчеркнуть, что в критериях (1.3.1.2 – 1.3.1.5) не рассматривается вопрос, способно ли судно двигаться во льдах с указанными скоростями по условиям ледовой ходкости.

При переносе изложенного подхода на рассматриваемую в настоящей статье задачу необходимо учитывать, что Правила РС традиционно отличаются консерватизмом принимаемых нормативных решений. Поэтому в рамках выполняемой ниже расчетной оценки принимаются более низкие значения нормативных допустимых скоростей:

$$[V_1] = 5 \text{ уз}, \quad [V_2] = 2,5 \text{ уз}. \quad (1.3.1.6)$$

1.3.2. Дополнительные положения и данные

1.3.2.1. Методология Правил РС рассматривает допустимые условия ледового плавания исключительно из условия обеспечения неповреждаемости конструкций ледовых усилений. Для выполнения расчетной оценки характеристик ледовых качеств дополнительно используются данные по ледовой ходкости КАС в виде кривой ледопроеходимости, определяющей достижимую скорость движения $V_{\text{ДОСТ}}$ в сплошном ровном льду толщиной H и пределом прочности на изгиб ($\sigma_{\text{изг}}$) 500 кПа или, в качестве обратной задачи, достижимую толщину сплошного ровного льда $H_{\text{ДОСТ}}$, в котором КАС способен двигаться со скоростью V :

$$\sigma_{\text{изг}} = 500 \text{ кПа}, \quad V_{\text{ДОСТ}} = V_{\text{ДОСТ}}(H) \text{ или } H_{\text{ДОСТ}} = H_{\text{ДОСТ}}(V) \quad (1.3.2.1)$$

На основании обобщения известных данных по ледовой ходкости КАС [8] установлено следующее значение достижимой толщины льда по условиям ледовой ходкости при самостоятельном плавании с нормативной скоростью $[V_1] = 5 \text{ уз}$:

$$H_{\text{ДОСТ,крл}} = H_{\text{ДОСТ}}([V_1]) = 1,4 \text{ м}. \quad (1.3.2.2)$$

Введем:

$H_{\text{ДОСТ,к}}$ – достижимая скорость для k -го эксплуатационного периода ($k=1$ – ЗВН, $k=2$ – ЛОН).

Можно считать, что значение $H_{крл}^{ДОСТ} = 1.4$ м согласно 1.3.2.1 соответствует условиям плавания в зимне-весеннюю навигацию ($k=1$), характеризующуюся высокой прочностью льда на изгиб:

$$H_{ДОСТ\ 1} = H_{ДОСТ\ крл} = 1.4 \text{ м.} \quad (1.3.2.3)$$

В летне-осенний период в условиях повышения температуры льда прочность льда снижается, а ледопроемимость увеличивается. Поэтому для летне-осеннего периода навигации принимается:

$$H_{ДОСТ\ 2} = 1.2 H_{ДОСТ\ 1} = 1.2 H_{ДОСТ\ крл} = 1.68 \text{ м} \quad (1.3.2.4)$$

1.3.2.2. На основании системы БДРД (см. рис. 1.3.1.1 и 1.3.1.2) определяются допустимые толщины льда для ледовых классов Arc5, Arc6, Arc7 (индекс ледового $c=5, 6, 7$) для зимне-весенней ($k=1$) и летне-осенней ($k=2$) навигаций при самостоятельном плавании с нормативной скоростью $[V_1] = 5 \text{ уз}$ – $H_{ДОП\ v1\ ck}$ (см. таб. 1.3.2.1.)

Таблица 1.3.2.1.

Допустимые толщины льда для ледовых классов Arc5, Arc6, Arc7 по условиям ледовой неповреждаемости при самостоятельном плавании с нормативной скоростью $[V_1] = 5 \text{ уз}$.

Ледовый класс	$H_{ДОП\ v1\ c1}$, м	$H_{ДОП\ v1\ c2}$, м
Arc5	0,87	1,05
Arc6	1,2	1,39
Arc7	1,65	2,18

1.3.2.3. Толщины льда $H^{v1\ ck}$, в которых возможно самостоятельное плавание по условиям ледовой неповреждаемости и ледовой ходкости, определяются на основании следующих зависимостей:

$$H^{v1\ ck} = \min(H_{ДОП\ v1\ ck}, H_{ДОСТ\ k}), \quad c=5, 6, 7, \quad k=1, 2. \quad (1.3.2.5)$$

Итоговые значения $H^{v1\ ck}$, определенные на основании соотношений (1.3.2.3) – (1.3.2.5) и таблицы 1.3.2.1, представлены в таблице 1.3.2.2.

Таблица 1.3.2.2.

Эксплуатационные толщины льда для ледовых классов Arc5, Arc6, Arc7 при самостоятельном плавании по условиям ледовой неповреждаемости и ледовой ходкости

Ледовый класс	$H^{v1\ c1}$, м	$H^{v1\ c2}$, м
Arc5	0,87	1,05
Arc6	1,2	1,39
Arc7	1,4	1,68

1.3.2.4. На основании системы БДРД (см. рис. 1.3.1.1 и 1.3.1.2) определяются допустимые толщины льда для ледовых классов Arc5, Arc6, Arc7 (индекс ледового $c=5, 6, 7$) для зимне-весенней ($k=1$) и летне-осенней ($k=2$) навигаций $H_{ДОП\ v2\ ck}$ при плавании под проводкой ледокола с нормативной скоростью $[V_2] = 2,5 \text{ уз}$. (см. таб. 1.3.2.3.)

Таблица 1.3.2.3.

Допустимые толщины льда для ледовых классов Arc5, Arc6, Arc7 по условиям ледовой неповреждаемости при плавании под проводкой ледокола с нормативной скоростью $[V_2] = 2,5 \text{ уз}$

Ледовый класс	$H_{ДОП\ v2\ c1}$, м	$H_{ДОП\ v2\ c2}$, м
Arc5	1,13	>4
Arc6	1,7	>4
Arc7	4	>4

1.4. Расчетная оценка продолжительностей самостоятельного плавания, плавания под проводкой ледокола и запрета ледовой эксплуатации КАС по Северному морскому пути применительно к арктическим ледовым классам Arc5, Arc6, Arc7

Изложенные в п. 3 методические основы расчетной оценки характеристик ледовых качеств на основании требований обеспечения ледовой неповреждаемости и с учетом ледопроемимости позволяют выполнить расчетную оценку продолжительностей режимов самостоятельного плавания, плавания под проводкой ледокола, ледовой эксплуатации и запрета ледовой эксплуатации, реализуемых при движении КАС по СМП от месторождений, расположенных на шельфе арктических морей, в западном и восточном направлениях.

1.4.1. Основные положения и результаты расчетной оценки продолжительности самостоятельного плавания

Представленные в таблице 1.3.2.2 значения $H^{v1\ ck}$ определяют максимальные толщины льда, в которых возможно самостоятельное плавание по условиям ледовой неповреждаемости и ледовой ходкости. Тогда соответствующие им согласно закону распределения (1.3.1.1) вероятности $P_{УПР\ jk}(H^{v1\ ck})$ определяют относительную (по отношению к продолжительности ЗВН или ЛОН) продолжительность $TСП^{O\ jkc}$ самостоятельного плавания в направлении j , в ЗВН ($k=1$) и ЛОН ($k=2$) для ледового класса c :

$$TСП^{O\ jkc} = P_{УПР\ jk}(H^{v1\ ck}), \quad (1.4.1.1)$$

или в процентах

$$TСП^{O\ \% jkc} = 100 \cdot TСП^{O\ jkc}, \% \quad (1.4.1.2)$$

Схема определения относительных продолжительностей $TСП^{O\ jkc} = P_{УПР\ jk}(H^{v1\ ck})$ проиллюстрирована на рис. 1.4.1.1.

Значения абсолютных (в месяцах) продолжительностей самостоятельного плавания за ЗВН/ЛОН, а также относительной (в процентах) и абсолютной (в месяцах) продолжительностей за ПГН ($k=0$) определяются на основании следующих зависимостей:

$$TСП_{jk} = N_k \cdot TСП^{O\ jkc}, \quad k=1,2, \text{ мес.}, \quad (1.4.1.3)$$

$$TСП_{j0c} = TСП_{j1c} + TСП_{j2c}, \text{ мес.}, \quad (1.4.1.4)$$

$$TСП^{O\ \% j0c} = 100 \cdot TСП_{j0c} / N_0, \% \quad (1.4.1.5)$$

Результаты расчетной оценки $TСП^{O\ \% jkc}$ и $TСП_{jk}$ для ЗВН и ЛОН – см. таб. 1.4.1.1, а $TСП^{O\ \% j0c}$ и $TСП_{j0c}$ для ПГН – см. табл. 1.4.1.2.

Таблица 1.4.1.1.

Абсолютные и относительные продолжительности самостоятельного плавания КАС для ЗВН (k=1) и ЛОН (k=2), западного (j=1) и восточного (j=2) направлений вывоза УВС, ледовых классов Arc5, Arc6, Arc7 (с=5, 6, 7)

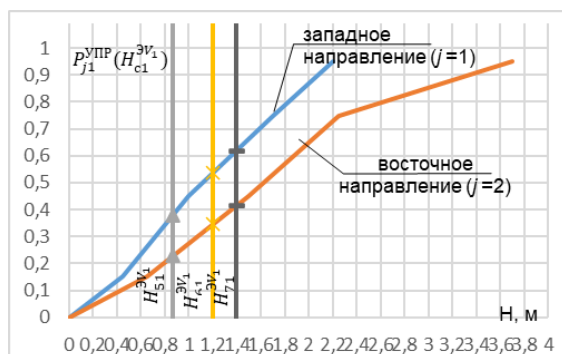
Ледовый класс (с)	Абсолютная (ТСП _{лк} , месяцы) и относительная (ТСП ^{0%} _{лк} , %) продолжительности самостоятельного плавания для ЗВН и ЛОН							
	Западное направление (j=1)				Восточное направление (j=2)			
	ЗВН (k=1)		ЛОН (k=2)		ЗВН (k=1)		ЛОН (k=2)	
	ТСП _{11с} мес.	ТСП ^{0%} _{11с} %	ТСП _{12с} мес.	ТСП ^{0%} _{12с} %	ТСП _{21с} мес.	ТСП ^{0%} _{21с} %	ТСП _{22с} мес.	ТСП ^{0%} _{22с} %
Arc5	2,3	38	5,5	91	1,44	24	4,02	67
Arc6	3,2	53	6	100	2,1	35	4,92	82
Arc7	3,7	62	6	100	2,52	42	5,4	90

Таблица 1.4.1.2.

Абсолютные и относительные продолжительности самостоятельного плавания КАС для ПГН, западного (j=1) и восточного (j=2) направлений вывоза УВС, ледовых классов Arc5, Arc6, Arc7 (с=5, 6, 7)

Ледовый класс (с)	Абсолютная (ТСП _{лс} , месяцы) и относительная (ТСП ^{0%} _{лс} , %) продолжительности самостоятельного плавания для ПГН			
	Западное направление (j=1)		Восточное направление (j=2)	
	ТСП _{1с} , мес.	ТСП ^{0%} _{1с} , %	ТСП _{2с} , мес.	ТСП ^{0%} _{2с} , %
Arc5	7,8	65	5,46	45,5
Arc6	9,2	77	7,0	58,3
Arc7	9,7	81	7,92	66

а) Зимне-весенняя навигация



б) Летне-осенняя навигация

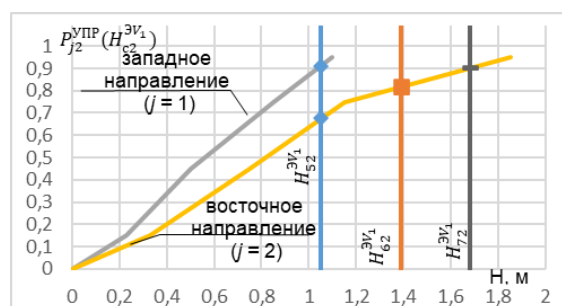


Рис. 1.4.1.1 Определение продолжительности самостоятельного плавания КАС применительно к арктическим ледовым классам Arc5, Arc6, Arc7 в зависимости от периода навигации и направления вывоза УВС

1.4.2. Основные положения и результаты расчетной оценки продолжительностей плавания под проводкой ледокола и запрета ледовой эксплуатации

Представленные в таблице 3.2.3 значения $H^{\text{эв}2}_{\text{СК}}$ определяют максимальные толщины льда, в которых возможна арктическая эксплуатация по условиям ледовой неповреждаемости. Тогда на основании закона распределения (3.1.1) относительная (по отношению к продолжительности ЗВН или ЛОН) максимальная продолжительность запрета ледовой эксплуатации $TЗЭ^0_{\text{лк}}$ в направлении j, в навигацию k для ледового класса с определяется по формуле:

$$TЗЭ^0_{\text{лк}} = 1 - P^{\text{УПР}}_{\text{лк}}(H^{\text{эв}2}_{\text{СК}}), \quad (1.4.2.1)$$

или в процентах

$$TЗЭ^0_{\text{лк}} = 100 TЗЭ^0_{\text{лк}}, \% \quad (1.4.2.2)$$

Схема определения относительных продолжительностей $TЗЭ^0_{\text{лк}}$ проиллюстрирована на рисунке 1.4.2.1.

Значения абсолютных (в месяцах) продолжительностей запрета ледовой эксплуатации КАС за зимне-весеннюю/летне-осеннюю навигации, а также относительной (в процентах) и абсолютной (в месяцах) продолжительностей за полную годовую навигацию определяются на основании следующих зависимостей:

$$TЗЭ_{\text{лк}} = N_k TЗЭ^0_{\text{лк}}, \text{ мес.} \quad (1.4.2.3)$$

$$TЗЭ_{\text{лс}} = TЗЭ_{\text{1с}} + TЗЭ_{\text{2с}}, \text{ мес.,} \quad (1.4.2.4)$$

$$TЗЭ^0_{\text{лс}} = 100 TЗЭ_{\text{лс}} / N_0, \% \quad (1.4.2.5)$$

Результаты расчетной оценки абсолютных $TЗЭ_{\text{лк}}$ и относительных $TЗЭ^0_{\text{лк}}$ продолжительностей запрета ледовой эксплуатации КАС для зимне-весенней и летне-осенней навигаций представлены в таблице 1.4.2.1, а продолжительностей $TЗЭ_{\text{лс}}$ и $TЗЭ^0_{\text{лс}}$ для полной (годовой) навигации – см. табл. 1.4.2.2.

Таблица 1.4.2.1.

Абсолютные и относительные продолжительности запрета ледовой эксплуатации КАС для ЗВН (k=1) и ЛОН (k=2), западного (j=1) и восточного (j=2) направлений вывоза УВС, ледовых классов Arc5, Arc6, Arc7 (с=5, 6, 7)

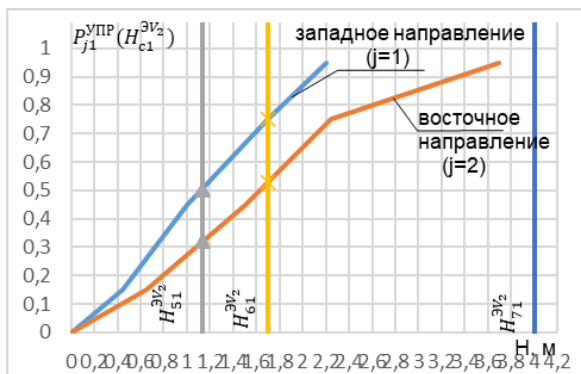
Ледовый класс (с)	Абсолютная ($TЗЭ_{jkс}$, месяцы) и относительная ($TЗЭ^{0\%}_{jkс}$, %) продолжительности запрета ледовой эксплуатации для ЗВН и ЛОН							
	Западное направление (j=1)				Восточное направление (j=2)			
	ЗВН (k=1)		ЛОН (k=2)		ЗВН (k=1)		ЛОН (k=2)	
	$TЗЭ_{11с}$ мес.	$TЗЭ^{0\%}_{11с}$ %	$TЗЭ_{12с}$ мес.	$TЗЭ^{0\%}_{12с}$ %	$TЗЭ_{21с}$ мес.	$TЗЭ^{0\%}_{21с}$ %	$TЗЭ_{22с}$ мес.	$TЗЭ^{0\%}_{22с}$ %
Arc5	2,9	49	0	0	4,1	68	0	0
Arc6	1,5	25	0	0	2,8	47	0	0
Arc7	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 1.4.2.2.

Абсолютные и относительные максимальные продолжительности запрета ледовой эксплуатации КАС для ПГН, западного (j=1) и восточного (j=2) направлений вывоза УВС, ледовых классов Arc5, Arc6, Arc7 (с=5, 6, 7)

Ледовый класс (с)	Абсолютная ($TЗЭ_{jc}$, месяцы) и относительная ($TЗЭ^{0\%}_{jc}$, %) продолжительности запрета ледовой эксплуатации для ПГН			
	Западное направление (j=1)		Восточное направление (j=2)	
	$TЗЭ_{1с}$ мес.	$TЗЭ^{0\%}_{1с}$ %	$ТПЛ_{2с}$ мес.	$ТПЛ^{0\%}_{2с}$ %
Arc5	2,9	24,5	4,1	34
Arc6	1,5	12,5	2,8	23,5
Arc7	0	0	0	0

а) Зимне-весенняя навигация



б) Летне-осенняя навигация

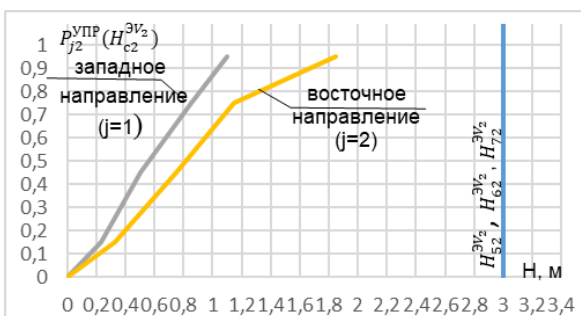


Рис. 1.4.2.1 Определение максимальной продолжительности запрета ледовой эксплуатации КАС применительно к арктическим ледовым классам

Arc5, Arc6, Arc7 в зависимости от периода навигации и направления вывоза УВС
 $TЗЭ^{0\%}_{jkс} = 1 - P_{jkс}^{УПР}(H_{cк}^{ЭВ_2})$

Значения абсолютных (в месяцах) и относительных продолжительностей плавания под проводкой ледокола КАС за зимне-весеннюю/летне-осеннюю навигации, а также относительной (в процентах) и абсолютной (в месяцах) продолжительностей за полную(-годовую-) навигацию определяются на основании следующих очевидных зависимостей:

$$ТПЛ^{0\%}_{jkс} = 1 - ТСП^{0\%}_{jkс} - ТЗЭ^{0\%}_{jkс} \quad (1.4.2.6)$$

$$ТПЛ^{0\%}_{jkс} = 100 \cdot ТПЛ^{0\%}_{jkс}, \% \quad (1.4.2.7)$$

$$ТПЛ_{jkс} = N_k \cdot ТПЛ^{0\%}_{jkс}, \text{ мес.}, \quad (1.4.2.8)$$

$$ТПЛ_{jc} = ТПЛ_{j1с} + ТПЛ_{j2с}, \text{ мес.}, \quad (1.4.2.9)$$

$$ТПЛ^{0\%}_{jc} = 100 \cdot ТПЛ_{jc} / N_0, \% \quad (1.4.2.10)$$

Результаты расчетной оценки абсолютных $ТПЛ_{jkс}$ и относительных $ТПЛ^{0\%}_{jkс}$ продолжительностей плавания под проводкой ледокола КАС для зимне-весенней и летне-осенней навигаций представлены в таблице 1.4.2.3, а $ТПЛ_{jc}$ и $ТПЛ^{0\%}_{jc}$ для полной (-годовой-) навигации – в таблице 1.4.2.4.

Таблица 1.4.2.3.

Абсолютные и относительные продолжительности плавания под проводкой ледокола КАС для ЗВН (k=1) и ЛОН (k=2), западного (j=1) и восточного (j=2) направлений вывоза УВС, ледовых классов Arc5, Arc6, Arc7 (с=5, 6, 7)

Ледовый класс (с)	Абсолютная ($T_{\text{пл}}^{\text{пл}}$, месяцы) и относительная ($T_{\text{пл}}^{\text{пл } 0\%}$, %) продолжительности плавания под проводкой ледокола для ЗВН и ЛОН							
	Западное направление (j=1)				Восточное направление (j=2)			
	ЗВН (k=1)		ЛОН (k=2)		ЗВН (k=1)		ЛОН (k=2)	
	$T_{\text{пл}}^{\text{пл } 11\text{с}}$ мес.	$T_{\text{пл}}^{\text{пл } 0\% 11\text{с}}$ %	$T_{\text{пл}}^{\text{пл } 12\text{с}}$ мес.	$T_{\text{пл}}^{\text{пл } 0\% 12\text{с}}$ %	$T_{\text{пл}}^{\text{пл } 21\text{с}}$ мес.	$T_{\text{пл}}^{\text{пл } 0\% 21\text{с}}$ %	$T_{\text{пл}}^{\text{пл } 22\text{с}}$ мес.	$T_{\text{пл}}^{\text{пл } 0\% 22\text{с}}$ %
Arc5	0,8	13	0	0	0,46	7,67	1,98	33
Arc6	1,3	22	0	0	1,1	18,3	1,08	18,3
Arc7	2,3	38	0	0	3,48	58,0	0,6	10

Таблица 1.4.2.4.

Абсолютные и относительные максимальные продолжительности плавания под проводкой ледокола КАС для ПГН, западного (j=1) и восточного (j=2) направлений вывоза УВС, ледовых классов Arc5, Arc6, Arc7 (с=5, 6, 7)

Ледовый класс (с)	Абсолютная ($T_{\text{пл}}^{\text{пл}}$, месяцы) и относительная ($T_{\text{пл}}^{\text{пл } 0\%}$, %) продолжительности плавания под проводкой ледокола для ПГН			
	Западное направление (j=1)		Восточное направление (j=2)	
	$T_{\text{пл}}^{\text{пл } 1\text{с}}$, мес.	$T_{\text{пл}}^{\text{пл } 0\% 1\text{с}}$, %	$T_{\text{пл}}^{\text{пл } 2\text{с}}$, мес.	$T_{\text{пл}}^{\text{пл } 0\% 2\text{с}}$, %
Arc5	0,8	6,5	2,46	20,5
Arc6	1,3	11	2,2	18,3
Arc7	2,3	19	4,08	34

1.5. Итоговые результаты расчетной оценки продолжительностей самостоятельного плавания, плавания под проводкой ледокола, ледовой эксплуатации и запрета ледовой эксплуатации для полной годовой навигации

Итоговые результаты расчетной оценки продолжительностей режимов работы КАС для ПГН представлены в таблицах 1.5.1 – 1.5.4.

Данные таблиц 1.5.1 – 1.5.4 демонстрируют следующую динамику изменения продолжительностей самостоятельного плавания (СП), плавания под проводкой ледокола (ПЛ), ледовой эксплуатации (ЛЭ=СП+ПЛ) и запрета ледовой эксплуатации (ЗЭ) для эксплуатационного периода ПГН при повышении ледового класса от Arc5 до Arc7:

- СП: с 65 % до 81 % для западного направления, с 46 % до 66 % для восточного направления;
- ПЛ: с 11 % до 19 % для западного направления, с 21 % до 34 % для восточного направления;
- ЛЭ: с 76 % до 100 % для западного направления, с 66 % до 100 % для восточного направления;
- ЗЭ: с 24 % до 0 % для западного направления, с 34 % до 0 % для восточного направления.

Таблица 1.5.1.

Продолжительности эксплуатационных режимов КАС для ПГН, западного направления вывоза УВС, ледовых классов Arc5, Arc6, Arc7, мес.

Ледовый класс	Самостоят. плавание (СП)	Проводка ледоколом (ПЛ)	Запрет ледовой эксплуатации (ЗЭ)
Arc5	7,8	1,3	2,9
Arc6	9,2	1,3	1,5
Arc7	9,7	2,3	0

Относительные продолжительности эксплуатационных режимов КАС для ПГН, западного направления вывоза УВС, ледовых классов Arc5, Arc6, Arc7, %

Ледовый класс	Самостоят. плавание (СП)	Проводка ледоколом (ПЛ)	Запрет ледовой эксплуатации (ЗЭ)
Arc5	65	10,8	24,2
Arc6	76,7	10,8	12,5
Arc7	80,8	19,2	0

Таблица 1.5.3.

Продолжительности эксплуатационных режимов КАС для ПГН, восточного направления вывоза УВС, ледовых классов Arc5, Arc6, Arc7, мес.

Ледовый класс	Самостоят. плавание (СП)	Проводка ледоколом (ПЛ)	Запрет ледовой эксплуатации (ЗЭ)
Arc5	5,46	2,46	4,08
Arc6	7,0	2,18	2,82
Arc7	7,92	4,08	0

Таблица 1.5.4.

Относительные продолжительности эксплуатационных режимов КАС для ПГН, восточного направления вывоза УВС, ледовых классов Arc5, Arc6, Arc7, %

Ледовый класс	Самостоят. плавание (СП)	Проводка ледоколом (ПЛ)	Запрет ледовой эксплуатации (ЗЭ)
Arc5	45,5	20,5	34,0
Arc6	58,3	18,2	23,5
Arc7	66,0	34,0	0

2. Направления совершенствования технологий расчетно-экспериментальных оценок характеристик ледовой ходкости КАС в сложных ледовых условиях

2.1. Характеристики ледовой ходкости КАС при плавании в сложных ледовых условиях

При выполнении представленной выше расчетной оценки характеристик ледовых качеств для режима СП использовались данные по ледовой ходкости КАС в виде кривой ледопроеходимости $V_{\text{ДОСТ}} = V_{\text{ДОСТ}}(H)$ (или $H_{\text{ДОСТ}} = H_{\text{ДОСТ}}(V)$) и из условия ледовой прочности в виде кривой БДРД $V_{\text{ДОП}} = V_{\text{ДОП}}(H)$ (или $H_{\text{ДОП}} = H_{\text{ДОП}}(V)$).

На основании этих данных определялись:

$H_{\text{ДОСТ}}^{V_1}_{\text{CK}} = H_{\text{ДОСТ}}(V=[V_1])$ – верхняя граница диапазона толщин льда, в котором возможно СП с нормативной скоростью $[V_1] = 5$ уз. по условиям ледовой ходкости,

$H_{\text{ДОП}}^{V_1}_{\text{CK}} = H_{\text{ДОП}}(V=[V_1])$ – верхняя граница диапазона толщин льда, в котором возможно СП с нормативной скоростью $[V_1] = 5$ уз. по условиям ледовой прочности,

$H_{\text{Э}}^{V_1}_{\text{CK}} = \min(H_{\text{ДОП}}^{V_1}_{\text{CK}}, H_{\text{ДОСТ}}^{V_1}_{\text{CK}})$ – верхняя граница диапазона толщин льда, в котором возможно СП с нормативной скоростью $[V_1] = 5$ уз. по условиям ледовой прочности и ледовой ходкости.

Режим ПЛ рассматривался только с позиции обеспечения ледовой прочности. Для него на основании системы БДРД (см. рис. 3.1.1 и 3.1.2) определялась допустимая толщина льда $H_{\text{ДОП}}^{V_2}_{\text{CK}} = H_{\text{ДОП}}(V=[V_2])$ как верхняя граница диапазона толщин, в котором возможно использование режима ПЛ при плавании с нормативной скоростью $[V_2] = 2,5$ уз.

Такой подход полностью приемлем при решении задачи выбора ледового класса на ранней стадии проектирования судна. Однако для решения задач обеспечения эффективной эксплуатации КАС, включающей расчеты операционных скоростей, планирование рейсов, ледокольной поддержки и других технико-эксплуатационных характеристик необходимо в дополнение к идеализированной модели сплошного ровного льда учитывать характерные особенности ледовых условий на трассах СМП, прежде всего наличие торосистости и наложения ледовых полей.

В целом данный круг задач относится к зоне ответственности судоводных компаний – операторов, эксплуатирующих КАС. Следует, однако, учитывать, что на настоящем этапе развития арктического судоводства опыт эксплуатации КАС весьма ограничен и, в силу политики конфиденциальности, не является достоянием научного, судоводного и проектного сообществ. С учетом отмеченного возрастает роль модельных экспериментов в ледовых бассейнах и расчетных оценок ледовой ходкости КАС в торосистых льдах. Опыт, накопленный ЦКБ «Лазурит» совместно с Крыловским ГНЦ (далее – КГНЦ) и ЦНИИМФ при разработке технического проекта крупнотоннажного танкера ледового класса Arc7, показывает, что проектное бюро на стадии разработки технического проекта КАС способно параллельно с традиционными работами по обеспечению ледовой ходкости в сплошном ровном льду, выполняемыми

согласно техническому заданию заказчика на разработку проектной документации, организовать, в сотрудничестве с компетентными научными организациями, выполнение дополнительных расчетно-экспериментальных исследований по заказу судоводной компании – оператора, направленных на разработку рекомендаций по прогнозированию работы КАС в сложных ледовых условиях: крупнобитом сплоченном льду и торосистом льду со средней торосистостью (2 – 3) балла.

Обобщение данного опыта и определение направлений его дальнейшего развития в целях построения кривых ледопроеходимости (КрЛП) и установления на их основе предельной ледопроеходимости (ПрЛП), определяющей возможность движения КАС с минимально устойчивой скоростью в режимах СП и ПЛ, рассматривается ниже.

2.2. Плавание в крупнобитом сплоченном льду.

Крупнобитый сплоченный лед представляет собой обломки льда размером от 20 м до 100 м сплоченностью 10 баллов, частично наложенные друг на друга в пределах зоны их контакта. За счет эффекта наложения данный тип ледяного образования является более тяжелым для прохождения судна, чем ровный сплоченный лед. Признанные методики расчета ледопроеходимости для крупнобитых сплоченных льдов на настоящий момент отсутствуют. В ледовом бассейне КГНЦ были выполнены работы по моделированию полей крупнобитого сплоченного льда (см. рис. 2.2.1) и проведены самоходные испытания модели танкера (см. рис. 2.2.2). Для обоснованного практического использования данных испытаний для прогнозирования ледовой ходкости КАС, построения КрЛП и установления на их основе ПрЛП в режиме СП необходимо дальнейшее совершенствование технологии подготовки полей крупнобитого сплоченного льда в части регламентации распределения размеров обломков льдин и объема их частичного наложения.



Рис. 2.2.1. Моделирование поля крупнобитого сплоченного (подторошенного) льда в ледовом бассейне КГНЦ



Рис. 2.2.2. Самоходные испытания в ледовом бассейне КГНЦ крупнотоннажного арктического танкера. Сплощенный крупнобитый лед. Толщина льда - 2,0 м. Передний ход. Балластная осадка

2.3. Преодоление участков торосистого льда со средней торосистостью (2 – 3) балла

Торосистость является характерной особенностью ледовых условий. Наличие торосистости резко снижает скорость движения судна, а при определенных условиях делает невозможным движение судна не только в режиме СП, но и при ПЛ [9,10, 11]. Практическая важность получения систематических данных о ледовой ходкости в торосистых льдах, необходимых для планирования ледовой эксплуатации (расчет операционных скоростей движения, планирование рейсов и ледокольной поддержки), не вызывает сомнений. Тем не менее технологии модельных испытаний в торосистых льдах на настоящий момент не отработаны в достаточной степени, в том числе по причине их сложности и высокой трудоемкости. А расчетные оценки ледовой ходкости, как правило основанные на введении поправок на торосистость к толщине ровного льда, упрощают сложную физическую картину и не дают надежных результатов, по крайней мере, при рассмотрении движения в относительно толстых льдах с торосистостью 2 балла и более.

Наибольший практический интерес имеют сценарии движения КАС в режиме ПЛ в относительно тяжелых ледовых условиях: толстые однолетние и двухлетние льды толщиной (2 – 3) м и торосистостью (2 – 3) балла. При преодолении этих ледовых образований реализуется следующая физическая картина. При прокладке ледоколом канала в торосистых льдах в канале остаются обломки льда из консолидированной части тороса и его кия, которые образуют в канале слой так называемого набитого льда. Толщина слоя набитого льда в канале зависит от толщины окружающего ровного льда и торосистости. КАС, следуя в канале за ледоколом, должен преодолевать ледовое сопротивление набитого льда, которое значительно превышает ледовое сопротивление мелкобитого льда, образуемого в канале, проложенном в ровном льду. Моделирование данной физической картины в ледовом бассейне, по крайней мере, затруднительно. Поэтому в рамках работ по обеспечению ледовой ходкости танкера ЦКБ «Лазурит» совместно с КГНЦ и ЦНИИМФ был использован следующий упрощенный подход.

Для имитации набитого льда в канале в ледовом бассейне КГНЦ создавались поля так называемого восторошенного льда, состоящего из мелкобитого

льда (обломков ровного льда) (рис. 2.3.1). Считалось, что толщина поля восторошенного льда эквивалентна толщине слоя набитого льда в канале. В свою очередь, толщина слоя набитого льда связывалась с толщиной окружающего торосы ровного льда и торосистостью льда на основании существующих эмпирических оценок [12]. Таким образом, слою набитого льда в канале толщиной $H_{нл}$, проложенном в поле торосистого льда с толщиной $H_{рл}$ и торосистостью T , ставилось в соответствие поле восторошенного льда толщиной $H_{вл}=H_{нл}$. Были выбраны 2 варианта характеристик набитого льда и эквивалентного восторошенного льда:

- набитый лед толщиной $H_{нл}=4$ м, образуемый при прокладке канала в многолетнем льду толщиной $H_{рл}=3$ м и торосистостью 2 балла – восторошенный лед толщиной $H_{вл}=4$ м;

- набитый лед толщиной $H_{нл}=8$ м, образуемый при прокладке канала в толстом однолетнем льду толщиной $H_{рл}=2$ м и торосистостью 3 балла – восторошенный лед толщиной $H_{вл}=8$ м.

В полях восторошенного льда проведены самоходные испытания модели танкера для 2-х режимов:

- движения в поле восторошенного льда, являющегося имитацией движения в широком канале, проложенном ледоколом пр. 10510 («Лидер») (см. рис. 2.3.2);

- движения в канале, проложенном моделью ледокола пр. 22220 в поле восторошенного льда, которое предварительно подмораживалось для создания на поверхности консолидированного слоя, являющегося имитацией движения в узком канале, проложенном ледоколом пр. 22220 (см. рис. 2.3.3).



Рис. 2.3.1. Поле восторошенного льда в ледовом бассейне КГНЦ



Рис. 2.3.2. Самоходные испытания. Движение в поле восторошенного льда, имитирующее движение в широком канале, проложенном ледоколом пр. 10510 («Лидер») в ледовом бассейне КГНЦ

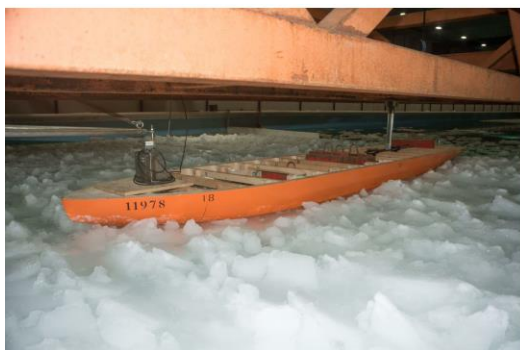


Рис. 2.3.3. Самоходные испытания. Движение в поле всторошенного льда с консолидированным слоем, имитирующее движение в узком канале, проложенном ледоколом пр. 22220 в ледовом бассейне КГНЦ

2.4. Направления совершенствования технологий расчетно-экспериментальных исследований ледовой ходкости КАС

В совокупности материалы по обеспечению ледовой ходкости танкера представляют собой современный комплекс экспериментальных и расчетных исследований, характеризующий оригинальными подходами и новыми для российского арктического судоходства данными. Результаты испытаний позволили подтвердить высокую эффективность принятых решений по форме обводов корпуса и составу движителей крупнотоннажного арктического танкера по сравнению с существующими иностранными аналогами. Вместе с тем для получения практически важных систематических данных о ледовой ходкости в сложных ледовых условиях, прежде всего в торосистых льдах, необходимых для планирования ледовой эксплуатации (расчет операционных скоростей движения, планирование рейсов и ледокольной поддержки), требуется дальнейшее уточнение подходов к обоснованию идентичности проводимых в ледовом бассейне КГНЦ испытаний действительным эксплуатационным режимам движения танкера в сложных ледовых условиях.

Анализ и обобщение выполненных расчетно-экспериментальных исследований ледовой ходкости крупнотоннажного арктического танкера позволяют сделать следующие выводы в отношении направлений совершенствования технологий ледовых испытаний:

- Использованный в испытаниях подход к формированию узкого канала в торосистом льду путем создания поля всторошенного льда, подмораживания поверхности всторошенного льда для образования консолидированного слоя и последующей прокладки узкого канала с помощью модели ледокола пр. 22220 представляется заслуживающим внимания. Однако описание способов количественного контроля характеристик консолидированного слоя и всторошенного льда на настоящее время отсутствует.

- Идентичность моделируемого режима движения в узком канале, проложенном во всторошенном льду, эксплуатационному режиму движения в узком канале

с набитым льдом, проложенном в торосистом льду, не имеет полноценного обоснования.

- Способ формирования широкого канала, проложенного в торосистом льду, путем создания поля всторошенного льда, а также идентичность моделируемого режима движения в широком канале, проложенном во всторошенном льду, эксплуатационному режиму движения в широком канале с набитым льдом, представляются спорными.

- Для всех режимов движения в канале, проложенном в торосистом льду, ширина торосистой перемычки принимается не менее длины судна независимо от торосистости льда. Обоснование этого требования отсутствует. Возможное влияние торосистости льда на ширину торосистой перемычки не обсуждается.

- Объем экспериментальных исследований должен обеспечивать возможности построения КрЛП и определение на их основе характеристик ПрЛП для ключевых эксплуатационных сценариев работы КАС в сложных ледовых условиях.

Заключение

3.1. Разработан способ выполнения укрупненной расчетной оценки технико-эксплуатационных характеристик ледовых качеств КАС.

Расчетная оценка базируется на научной методологии, заложенной в требования действующих Правил РС в части ледовой классификации и ледовой прочности, а также данных о ледовой ходкости КАС.

В результате расчетной оценки для заданного ледового класса КАС определяются технико-эксплуатационные характеристики ледовых качеств: продолжительности самостоятельного плавания в ледовых условиях, плавания под проводкой ледокола, запрета ледовой эксплуатации.

Представлены результаты расчетной оценки, демонстрирующие динамику изменения технико-эксплуатационных характеристик ледовых качеств КАС для эксплуатационных периодов зимне-весенней и полной годовой навигаций при повышении ледового класса от Arc5 до Arc7.

Полученные результаты могут использоваться в качестве исходных данных при выполнении сравнительного ТЭА по определению оптимального ледового класса КАС, предназначенного для вывоза УВС по Северному морскому пути в западном и восточном направлениях.

3.2. Выполнены анализ и обобщение комплексных расчетно-экспериментальных исследований ледовой ходкости крупнотоннажного арктического танкера в сложных ледовых условиях – при самостоятельном плавании в крупнобитых сплоченных льдах и при плавании в канале за ледоколом, проложенном в торосистых льдах.

По результатам анализа определены направления дальнейшего совершенствования технологий модельных ледовых испытаний, нацеленные на усиление роли расчетно-экспериментальных исследований ледовой ходкости при решении задач планирования ледовой эксплуатации и ледокольной поддержки судоходными компаниями – операторами КАС.

Литература

1. Правила плавания в акватории Северного морского пути (утверждены постановлением Правительства РФ от 18.09.2020 г. № 1487).
2. Апполонов Е.М. Ледовая прочность судов, предназначенных для круглогодичной арктической навигации. СПбГМТУ, 2016, 288 с.
3. Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Дидковский А.В., Кутейников М.А. Новые ледовые правила, установленные Российским морским регистром судоходства // Тез. 6-й межд. конф. ICETECH'2000, Санкт-Петербург, 2000. С. 48–56.
4. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть I «Классификация». НД № 2-020101-095. – СПб., 2017.
5. Атлас Арктики / Под ред. А.Ф. Трешникова. М. Главное Управление геодезии и картографии при Сов. Мин. СССР, 1985.
6. Романов И.П. Ледяной покров Арктического бассейна. Л.: Изд. ААНИИ, 1991.
7. Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Степанов И.В., Тимофеев О.Я. Регламентация допускаемых условий ледового плавания арктических судов // Тр. ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. СПб., 1996. Вып.3 (287). С. 8–14.
8. Цой Л.Г., Андрияшин А.В., Штрек А.А. Обоснование основных параметров перспективных крупнотоннажных газовозов для Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2013. - №3 (97). – С. 46-56.
9. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий Е.Г. Научные исследования в Арктике. Том 2 Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. Санкт-Петербург, 2007.
10. Бородачев В.Е. Льды Карского моря, Санкт-Петербург, Гидрометеиздат, 1998.
11. Данилова А.И., Миронова Е.У., Спичкина В.А. Изменчивость природных условий в шельфовой зоне Баренцева и Карского морей, г. Санкт-Петербург, 2004.
12. Люси Струб-Кляйн, Дениз Судом. Комплексный анализ морфологии торосов однолетнего морского льда. Международный журнал "Cold Regions Science and Technology" («Наука и технологии холодных регионов»). Том 82, октябрь 2012 г., стр. 94–109.

References

1. Rules of Navigation in the Water Area of the Northern Sea Route (approved by the RF Government Resolution No. 1487 dtd. September 18, 2020).
2. Appolonov E.M. Ice Strength of Vessels Designed for Year-round Arctic Navigation. SPbSMTU, 2016, 288 pp.
3. Appolonov E.M., Nesterov A.B., Didkovski A.V., Kuteinikov M.A. New ice rules issued by the Russian Maritime Registr of Shipping // Proc. of the 6th int. conf. ICETECH'2000, St.-Petersburg, 2000. P. 48–56.
4. Russian Maritime Register of Shipping. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part I. Classification. ND No. 2-020101-095. – St. Petersburg, 2017.
5. Atlas of the Arctic / Ed. by A.F. Treshnikov. Moscow: Main Directorate of Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the USSR, 1985.
6. Romanov I.P. Ice Cover of the Arctic Basin. Leningrad: AARI Publ., 1991.
7. Appolonov E.M., Nesterov A.B., Stepanov I.V., Timofeev O.Ya. Regulation of Assumed Conditions for Ice Navigation of Arctic Vessels // Proceedings of Krylov Central Research Institute. St. Petersburg, 1996. Issue 3 (287). pp. 8–14.
8. Tsoi L.G., Andryushin A.V., Shtrek A.A. Substantiation of Principal Parameters of Prospective Large-Capacity LNG Carriers for the Arctic // Problems of the Arctic and Antarctic. – 2013. – No. 3 (97). – P. 46-56.
9. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G., Smolyanitsky E.G. Scientific Research in the Arctic. Volume 2. Climatic Changes in the Ice Cover of the Eurasian Shelf Seas. St. Petersburg, 2007.
10. Borodachev V.E. Ice of the Kara Sea, St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1998.
11. Danilova A.I., Mironova E.U., Spichkina V.A. Variability of Natural Conditions in the Shelf Zone of the Barents and Kara Seas, St. Petersburg, 2004.
12. Lucie Strub-Klein, Denise Sudom. A comprehensive analysis of the morphology of first-year sea ice ridges. Cold Regions Science and Technology. Volume 82, October 2012, Pages 94-109. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.05.014>.

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

Апполонов Евгений Михайлович, доктор технических наук, профессор, советник исполнительного директора АО «ЦКБ «Лазурит», 603951, Нижний Новгород, ул. Свободы, 57, e-mail: em_appolonov@cdb-lazurit.ru

Петров Анатолий Сергеевич, директор филиала АО «ЦКБ «Лазурит» в г. Санкт-Петербурге, 191036, г. Санкт-Петербург, пр-т Лиговский, д. 6, корп. 2, лит. А, e-mail: as_petrov@spb-lazurit.ru

Черноморец Андрей Леонидович, заместитель главного конструктора в филиале АО «ЦКБ «Лазурит» в г. Санкт-Петербурге, 191036, г. Санкт-Петербург, пр-т Лиговский, д. 6, корп. 2, лит. А, e-mail: al_chernomorets@spb-lazurit.ru

Юхнин Алексей Владимирович исполнительный директор АО «ЦКБ «Лазурит», 603951, Нижний Новгород, ул. Свободы, 57, e-mail: av_yukhnin@cdb-lazurit.ru

Evgeniy M. Appolonov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Advisor to Executive Director, Lazurit Central Design Bureau JSC, Svobody str. 57, Nizhny Novgorod, 603951, Russian Federation, e-mail: em_appolonov@cdb-lazurit.ru

Anatoliy S. Petrov, Branch Director, Lazurit Central Design Bureau JSC, Ligovsky prospect, Building 6/2, lit. A, St. Petersburg, 191036, Russian Federation, e-mail: as_petrov@spb-lazurit.ru

Andrey L. Chernomorets, Deputy Chief Designer, St-Petersburg Branch of Lazurit Central Design Bureau JSC, Ligovsky prospect, Building 6/2, lit. A, St. Petersburg, 191036, Russian Federation, e-mail: al_chernomorets@spb-lazurit.ru

Alexey V. Yukhnin, Executive Director, Lazurit Central Design Bureau JSC, Svobody str. 57, Nizhny Novgorod, 603951, Russian Federation, e-mail: av_yukhnin@cdb-lazurit.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 31.10.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 21.11.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 03.02.2026.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

TECHNOLOGY OF SHIP BUILDING. SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION

Научная статья

УДК 621.9-219.1-752

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.004>

Повышение эффективности внутреннего шлифования цилиндров гидравлических насосов в условиях плавучих мастерских

Братан С.М.¹ serg.bratan@gmail.com, Харченко А.О.¹ khao@list.ru,
Часовитина А.С.² Chas_MSU@list.ru, Владецкая Е.А.² vladetski@gmail.com

¹Севастопольский государственный университет

²Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. Предметом рассмотрения в статье является исследование возможных путей повышения эффективности обработки деталей из титановых сплавов на операциях шлифования в условиях плавучих мастерских. В работе рассмотрены циклы управления операциями внутреннего шлифования цилиндра гидравлического насоса, учитывающие изменение состояния технологической системы на протяжении периода стойкости инструмента. В работе операция шлифования рассмотрена как объект фазового пространства и определены координаты поля коррекции технологических режимов, отклонения которых относительно их теоретических значений имеют погрешность измерений, не превышающую 5 %. Приведена методика расчета коэффициентов коррекции и выполнен ряд экспериментов для проверки адекватности полученных моделей. Анализ полученных расчетных и экспериментальных данных по коэффициенту коррекции цикла внутреннего шлифования показал, что разработанная методика позволяет минимизировать дефекты поверхности, снизить износ режущего инструмента и повысить эффективность обработки и демонстрирует тенденцию к увеличению стабильности выходных параметров процесса шлифования.

Ключевые слова: внутреннее шлифование, плавучие мастерские, поле коррекции технологических режимов, шероховатость, показатели качества, износ инструмента, повышение эффективности обработки, цилиндр гидравлического насоса.

Для цитирования: Братан С.М., Харченко А.О., Часовитина А.С., Владецкая Е.А. Повышение эффективности внутреннего шлифования цилиндров гидравлических насосов в условиях плавучих мастерских, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 53—60. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.004.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.004>

Improving the efficiency of internal grinding of hydraulic pump cylinders in floating workshops

Sergey M. Bratan¹ serg.bratan@gmail.com, Alexander O. Kharchenko¹ khao@list.ru,
Anastasiia S. Chasovitina² Chas_MSU@list.ru, Ekaterina A. Vladetskaya² vladetski@gmail.com

¹Sevastopol State University,

²Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. The subject of consideration in the article is the study of possible ways to improve the efficiency of machining titanium alloy parts during grinding operations in floating workshops. The paper considers the control cycles of the internal grinding operations of a hydraulic pump cylinder, which take into account the change in the state of the technological system during the period of tool durability. In this paper, the grinding operation is considered as an object of phase space and the coordinates of the correction field of technological modes are determined, the deviations of which relative to their theoretical values have a measurement error not exceeding 5%. A method for calculating correction coefficients is given and a number of experiments are performed to verify the adequacy of the obtained models. An analysis of the calculated and experimental data obtained on the correction coefficient of the internal grinding cycle showed that the developed technique minimizes surface defects, reduces wear of the cutting tool and improves processing efficiency, and demonstrates a tendency to increase the stability of the output parameters of the grinding process.

Key words: internal grinding, floating workshops, the field of correction of technological modes, roughness, quality indicators, tool wear, increased processing efficiency, hydraulic pump cylinder.

For citation: Sergey M. Bratan, Alexander O. Kharchenko, Anastasiia S. Chasovitina, Ekaterina A. Vladetskaya. Improving the efficiency of internal grinding of hydraulic pump cylinders in floating workshops, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 39—60. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.004.

Введение

За последние пять лет возрос процент применения титана и титановых сплавов в гражданском судостроении, особенно в странах с развитой судостроительной индустрией и научными исследованиями в области материаловедения.

Широкое использование титановых сплавов обусловлено их высокой прочностью, коррозионной стойкостью и низким весом. Из титана и титановых сплавов изготавливают гидравлические цилиндры, золотники, корпуса клапанов, детали насосов, фитинги и соединения гидравлической системы.

Одним из ограничений применения титановых сплавов является достаточно высокая стоимость сырья и сложность обработки, возникающая вследствие высокой реакционной способности материала.

После механической или других видов обработки на поверхности деталей из титана и титановых сплавов могут оставаться царапины, оксидные пленки и микротрещины. Шлифование помогает устранить эти дефекты, повышая качество поверхности и улучшая эксплуатационные характеристики [1-11]. Помимо этого, поверхность с минимальной шероховатостью обеспечивает точную посадку и снижает трение, тем самым повышая эффективность работы системы.

Операция шлифования в условиях плавучих мастерских осложнена особенностями морской среды, а именно нестабильным положением и колебаниями судна [12, 13]. Помимо внешних воздействий на технологическую систему, наблюдается возникновение вынужденных колебаний в подсистеме «зона контакта», где инструмент непосредственно взаимодействует с обрабатываемой поверхностью. Совместные колебательные движения абразивного инструмента и обрабатываемой заготовки обусловлены,

например, несовпадением центра масс и центра формы инструмента, отклонением формы абразивного инструмента и других.

На основании анализа существующих исследований в области алмазно-абразивной обработки в условиях плавучих мастерских можно сделать следующее заключение, что технологическая система изменяет свое состояние с течением времени [14].

В течение срока службы шлифовального инструмента происходит изменение параметров рабочей зоны, таких как количество абразивных зерен, их распределение по глубине и длине контактной области. Эти изменения обусловлены совместными колебаниями абразивного инструмента и обрабатываемой заготовки, амплитуда которых возрастает с течением времени. При этом режимы резания, рассчитанные на основе детерминированных зависимостей, не учитывают указанные динамические явления. В результате возникают дефектные изделия или существенно снижается производительность технологического процесса.

Материалы и методы

Для уменьшения доли дефектных изделий разработаны циклы управления операциями внутреннего шлифования цилиндра гидравлического насоса, которые учитывают изменение состояния технологической системы на протяжении срока службы инструмента. Эти циклы основаны на теоретико-вероятностных моделях и предполагают оптимизацию технологических режимов [15-18]. Иллюстрация изменения параметров внутреннего врезного шлифования в течение периода стойкости инструмента при постоянной продольной подаче представлена на рис. 1.

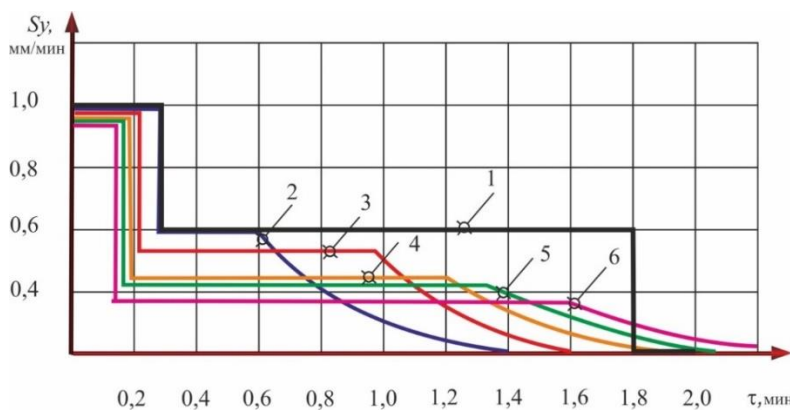


Рис. 1. Изменение цикла внутреннего врезного шлифования за период стойкости инструмента по продольной подаче: 1 – типовой цикл; 2, 3, 4, 5, 6 – коррекционные циклы внутреннего шлифования для партии из пяти деталей

Недостатком указанного метода является необходимость многократного перерасчета циклов, что обуславливает значительные временные затраты и повышает трудоемкость этапов подготовки технологического процесса. В условиях мастерских, при осуществлении шлифовальных операций заготовок на универсальных станках, зачастую возникает необходимость осуществления корректировки существующего цикла без его

изменения структурных элементов, что требует разработки методов адаптации, минимизирующих временные и ресурсные издержки.

В ходе проведенных экспериментов была получена поверхность характеристик исследуемой многофакторной системы, что позволяет рассматривать операцию шлифования как объект фазового пространства, с множеством управляющих координат (например, радиальной и осевой подачи,

скорости вращения заготовки и инструмента и др.), значения которых определяют динамическое поведение технологической системы в каждый конкретный момент времени. В данном контексте интервалом времени выступает период стойкости инструмента. Поперечное сечение исследуемой поверхности представляет собой траектории изменения управляющих координат (рис. 2), восстановление значений которых в последующие моменты осуществляется за счёт поля коэффициентов коррекции технологических режимов (рис. 3).

Координаты поля коэффициентов коррекции технологических режимов для i -й обрабатываемой заготовки после проведения корректировки инструмента определяются как отношение значений

множества управляющих параметров, вычисленных с учетом фактического состояния рабочей поверхности режущего инструмента, к соответствующим параметрам, зафиксированным в конце периода его стойкости. На траектории полученного поля коррекции непосредственно размещаются вычисленные коэффициенты коррекции управляющих параметров.

Для схемы врезного шлифования координаты поля коррекции технологических режимов A будут следующие:

$$A = \{K_{Syl}; K_{V_{ul}}\},$$

где K_{Syl} – координата поля по продольной подаче;

$K_{V_{ul}}$ – координата поля по скорости вращения заготовки;

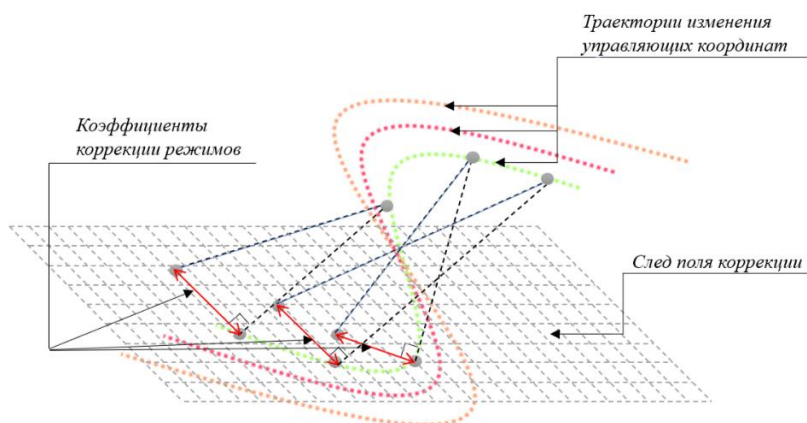


Рис. 2. Сечение исследуемой многофакторной системы

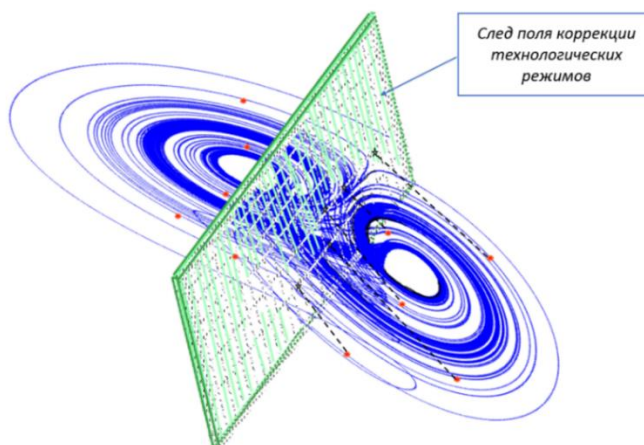


Рис. 3. Графическая интерпретация операции внутреннего шлифования в виде объекта фазового пространства

для схемы шлифования на проход координаты поля коррекции технологических режимов B :

$$B = \{K_{Sxi}; K_{Syl}; K_{V_{ul}}\},$$

где K_{Sxi} – координата поля по осевой подаче;

K_{Syl} – координата поля по продольной подаче;

$K_{V_{ul}}$ – координата поля по скорости вращения заготовки.

Пусть цикл шлифования состоит из трех этапов: 1 – форсированный режим; 2 – черновое шлифование;

3 – чистовое шлифование. Этап выхаживания отсутствует.

На первом участке цикла создается предварительный натяг между шлифовальным инструментом и поверхностью заготовки. На этом участке цикла значение поперечной подачи лимитируется прочностными и кинематическими возможностями технологической системы.

Величина поперечной подачи на втором участке рассчитывается с учетом допустимой величины силы резания $P_y \leq P_{y\text{доп}}$

$$P_{\Sigma y} = 3\sqrt{2}L_k n_g \sqrt{\rho_g h_{g\max} D_e \left(t_f - \frac{t_f^2}{\frac{7\pi}{15} t_f + \frac{13\pi}{3} \frac{V_u}{K_c (V_k + V_u) n_g \sqrt{D_e \cdot \rho_g}} + \Psi^{0.4}} \right)} \times$$

$$\times \left(0,055 \frac{\sin \beta}{\sin \beta_1} \left(t_f - \frac{t_f^2}{\frac{7\pi}{15} t_f + \frac{13\pi}{3} \frac{V_u}{K_c \cdot (V_k + V_u) \cdot n_g \cdot \sqrt{D_e \cdot \rho_g}} + \Psi^{0.4}} \right) + 0,061 \sqrt{\rho_g h_{g\max}} \tau_s \right);$$

где K_c – коэффициент стружкообразования;

V_u – скорость вращения заготовки, м/с;

V_k – скорость вращения инструмента, м/с;

t_f – глубина микрорезания, м;

n_g – количество зерен в единице площади, шт/м²;

ρ_g – радиус вершин округления зерна, м;

D_e – эквивалентный диаметр, м,

L_k – высота шлифовального круга, м;

$h_{g\max}$ – износ зерна, м;

β и β_1 – углы резания абразивного материала,

τ_s – напряжение сдвига, Н/м².

Величина Ψ будет определена в соответствии с начальной фазой отклонений:

например, при $\psi_y = \frac{\pi}{2}$ и $\psi_y = \frac{3\pi}{2}$:

$$\Psi = \frac{15}{16} A_\omega^2 \cdot \sqrt{t_f} - \frac{15 \cdot A_\omega^2 \cdot V_u \cdot \sin 2\gamma}{32 \cdot \omega \cdot D_e^{0.5}},$$

где A_ω – амплитуда, мкм;

ω – циклическая частота, рад/с;

ψ_y – начальная фаза вибраций;

переменная $\gamma = \frac{\omega \cdot (t_f - y)^{0.5} \cdot D_e^{0.5}}{V_u}$, где

y – рассматриваемый уровень.

Чтобы осуществить расчет коэффициента коррекции продольной подачи K_{Syi} приравняем текущее значение радиальной силы резания при обработке i -го и N -го отверстия допустимой силе резания:

$$P_{дон.N} = K_1 \cdot \frac{(t_{fN} - \Delta r_N)^{z+0.5}}{t_{fN}^z} \cdot [K_2 \cdot (t_{fN} - \Delta r_N) + K_3]$$

$$P_{yдон.i} = K_1 \cdot \frac{(t_{fi} - \Delta r_i)^{z+0.5}}{t_{fi}^z} \cdot [K_2 \cdot (t_{fi} - \Delta r_i) + K_3]$$

где $K_1 = 4,24 L_k n_g \sqrt{\rho_g h_{g\max} D_e}$;

$$K_2 = 0,055 \frac{\sin \beta}{\sin \beta_1};$$

$$K_3 = 1,83 L_k n_g \tau_s \sqrt{2 \rho_g h_{g\max}}.$$

Учитывая, что на втором участке цикла отсутствуют приращения упругих деформаций и приращения фактических глубин микрорезания – выражение баланса перемещений

$$\Delta A_i = S_{yi} + N = \Delta t_{fi} - \Delta R_i + \Delta r_{oi-1} + \Delta A_{yi},$$

где ΔA_i – текущее изменение величины межцентрового расстояния, за счет радиальной подачи шлифовальной головки, м;

S_{yi} – радиальная подача инструмента, м;

N – предварительный натяг, м;

Δt_{fi} – изменение фактической глубины резания, м;

ΔR_i – текущий износ инструмента, м;

Δr_{oi-1} – величина съема материала перед текущим оборотом, м;

ΔA_{yi} – текущее изменение упругих деформаций; переписывается в виде:

$$\Delta A_j = \Delta r_{j-1} + \Delta R_j.$$

Коэффициент коррекции поперечной подачи может быть определен:

$$K_{Syi} = \frac{\Delta r_i}{\Delta r_N},$$

где Δr_i и Δr_N – величины радиальных съемов материала за один оборот абразивного инструмента при шлифовании i -го и N -го отверстия. Соответственно.

Для третьего участка цикла коэффициент коррекции по поперечной подаче рассчитывается

$$K_{jd} + R_{\max d} = \frac{t_f^2}{\frac{7\pi}{15} t_f + \frac{13\pi}{3} \cdot \frac{V_u}{K_c \cdot (V_k + V_u) \cdot n_g \cdot \sqrt{D_e \cdot \rho_g}} + \Psi^{0.4}},$$

$$R_{\max j} \approx t_{fi} - \Delta r_i,$$

где Π_{jd} - припуск, оставшийся не удаленным после i -го прохода инструмента на обрабатываемой поверхности,

$R_{\max j}$ - текущая шероховатость.

аналогичным образом с учетом того, что основным ограничением является шероховатость поверхности:

При наличии этапа «выхаживания» значение поперечной подачи равно нулю. Коэффициент коррекции этого этапа согласно выражениям равен единице.

Расчетные значения коэффициентов коррекции и поперечных подач для всех этапов цикла приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов коррекции K_{Syi} и поперечных подач S_y для этапов цикла внутреннего шлифования

Номер обрабатываемой заготовки	форсированный режим		Черновое шлифование		Чистовое		Выхаживание	
	K_{Syi}	S_y	K_{Syi}	S_y	K_{Syi}	S_y	K_{Syi}	S_y
1	1	10	1,51	2,23	1,42	0,69	1	0
2	1	10	1,42	2,12	1,38	0,65	1	0
3	1	10	1,37	2,07	1,31	0,63	1	0
4	1	10	1,33	2,00	1,27	0,60	1	0
5	1	10	1,29	1,93	1,24	0,58	1	0
6	1	10	1,22	1,84	1,19	0,55	1	0
7	1	10	1,18	1,79	1,14	0,53	1	0
8	1	10	1,13	1,73	1,08	0,51	1	0
9	1	10	1,10	1,67	1,02	0,49	1	0
10	1	10	1,09	1,52	1	0,47	1	0

Анализ полученных расчетных данных по коэффициенту коррекции цикла внутреннего шлифования цилиндров демонстрирует его закономерное убывание в течение периода стойкости инструмента. Взаимосвязь коэффициента с числом обрабатываемых поверхностей проявляет почти линейную зависимость (рис. 4), что способствует упрощению методики вычислений: целесообразно определять точные значения коэффициента только для обработки первой заготовки (поверхности), в то время как для последующих заготовок коэффициенты могут быть оценены на основе пропорциональных соотношений.

Так, например, при шлифовании цилиндр коэффициент коррекции на этапе черновой подачи при обработке первой заготовки составляет 1,51, а при обработке десятой — равен 1. Для второй и третьей заготовок соответствующие значения коэффициента определяются как

$$K_{Sy2} = 1,51 - \frac{(1,51 - 1) \cdot 2}{10} = 1,41;$$

$$K_{Sy3} = 1,51 - \frac{(1,51 - 1) \cdot 3}{10} = 1,36.$$

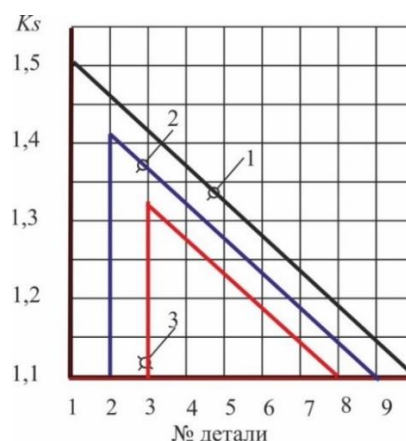


Рис. 4. Взаимосвязь коэффициента коррекции с числом обрабатываемых деталей

Для оценки допустимости принятых методик выполнен расчет отклонений коэффициентов коррекции относительно их теоретических значений. В результате анализа установлено, что погрешность измерений не превышает 5 %, что в 1,5 — 1,8 раза ниже погрешностей, характерных для косвенных методов измерения.

При значениях коэффициента коррекции 1,3, 1,41 и 1,5 все обрабатываемые детали соответствуют требованиям технологической документации по параметрам шероховатости поверхности, допуску на изготовление и биению относительно оси. При значении коэффициента коррекции, равном

$K_{sy} = 1,6$, одна из деталей вышла за пределы допустимых значений по шероховатости поверхности. Значение $K_{sy} = 1,5$ является предельным для данных производственных условий и соответствует расчетным данным ($K_{sy} = 1,41$), полученным с использованием предложенной методики.

Результаты

Результаты проведенных экспериментов, включающих данные с коррекцией циклов и без, при

внутреннем шлифовании цилиндров, представлены в таблице 2.

Для анализа экспериментальных данных было рассчитано среднеквадратическое отклонение двух параметров – биения отверстия относительно центральной оси и шероховатость обработанной поверхности. Величина отклонения при использовании предложенной технологии, учитывающей коррекцию режимов, значительно уменьшилась по сравнению с типовой (без коррекции режимов).

Таблица 2

Влияние коррекции режимов на параметры качества обрабатываемой поверхности

Без коррекции режимов						
№ п/п	Биение отверстия относительно центральной оси – Δ_a , мкм			Шероховатость поверхности – R_a , мкм		
	Max	Min	Среднеквадратическое отклонение, σ мкм	Max	Min	Среднеквадратическое отклонение, σ мкм
1	0,024	0,02	0,0157	0,64	0,46	0,3992
2	0,021	0,007	0,0121	0,61	0,53	0,4050
3	0,025	0,008	0,0144	0,62	0,47	0,3926
С учетом коррекции режимов						
	Max	Min	Среднеквадратическое отклонение, σ мкм	Max	Min	Среднеквадратическое отклонение, σ мкм
1	0,021	0,011	0,0124	0,45	0,29	0,2736
2	0,016	0,006	0,0092	0,34	0,22	0,2069
3	0,017	0,009	0,01	0,39	0,31	0,2507

Полученные данные свидетельствуют о том, что использование предложенной методики позволяет минимизировать дефекты поверхности, снизить износ режущего инструмента и повысить эффективность обработки, а также в ходе анализа обнаружена тенденция к увеличению стабильности выходных параметров процесса шлифования.

Заключение

Обработка прецизионных поверхностей, использующихся в герметичных соединениях трубопроводов, может осуществляться посредством различных методик, таких как ультразвуковая обработка, высокоскоростное фрезерование или абразивно-алмазная обработка.

Внутреннее шлифование получило широкое использование за счет высокой производительности

процесса и обеспечения требуемой точностью формируемой поверхности. Данная операция позволяет достигать уровней точности по стандартам, соответствующих 7-6 качеству при операциях чистового шлифования и 6-5 качеству при тонком шлифовании.

Шлифование изделий из титана и титановых сплавов в условиях плавучих мастерских представляет собой сложный технологический процесс не только из-за свойств обрабатываемого материала, но и по причине нестабильности условий окружающей среды (ветер, колебания судна, вибрации). При обработке существует высокий риск появления дефектов поверхности, однако его можно минимизировать при использовании технологических режимов с учетом коэффициентов коррекции.

Литература

- Novoselov, Y. Patterns of Removing Material in Workpiece - Grinding Wheel Contact Area / Y. Novoselov, V. Bogutsky, L. Shron // Procedia Engineering : International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017, Saint-Petersburg, 16–19 of may 2017 year. – Saint-Petersburg: Elsevier Ltd, 2017. – P. 991-996. – DOI 10.1016/j.proeng.2017.10.583.
- Kassen G., Werner G. Kinematische Kenngrößen des Schleifvorganges [Kinematic parameters of the grinding process]. Industrie-Anzeiger = Industry scoreboard, 1969, no. 87, pp. 91–95. (In German).
- Malkin S., Guo C. Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives. New York, Industrial Press, 2008. 372 p. ISBN 978-0-8311-3247-7.
- Hou Z.B., Komanduri R. On the mechanics of the grinding process. Pt. 1. Stochastic nature of the grinding process. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, vol. 43, pp. 1579–1593. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00186-X.
- Lajmert P., Sikora V., Ostrowski D. A dynamic model of cylindrical plunge grinding process for chatter phenomena investigation. MATEC Web of Conferences, 2018, vol. 148, pp. 09004–09008. DOI: 10.1051/mateconf/20181480900.
- Leonesio M., Parenti P., Cassinari A., Bianchi G., Monn M. A time-domain surface grinding model for dynamic simulation. Procedia CIRP, 2012, vol. 4, pp. 166–171. DOI: 10.1016/j.procir.2012.10.030.

7. Zhang N., Kirpitchenko I., Liu D.K. Dynamic model of the grinding process. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, vol. 280, pp. 425–432. DOI: 10.1016/j.jsv.2003.12.006.
8. Jung J., Kim P., Kim H., Seok J. Dynamic modeling and simulation of a nonlinear, non-autonomous grinding system considering spatially periodic waviness on workpiece surface. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 2015, vol. 57, pp. 88–99. DOI: 10.1016/j.simpat.2015.06.005.
9. Yu H., Wang J., Lu Y. Modeling and analysis of dynamic cutting points density of the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 86, pp. 1933–1943. DOI: 10.1007/s00170-015-8262-0.
10. Guo J. Surface roughness prediction by combining static and dynamic features in cylindrical traverse grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 75, pp. 1245–1252. DOI: 10.1007/s00170-014-6189-5.
11. Soler Ya.I., Le N.V., Si M.D. Influence of rigidity of the hardened parts on forming the shape accuracy during flat grinding. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, p. 01076. DOI: 10.1051/mateconf/201712901076.
12. Динамика вибрационных воздействий на шлифовальный станок в условиях плавучей мастерской с учетом морского волнения / Е. А. Владецкая, С. М. Братан, А. О. Харченко, Е. В. Хекерт // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2022. – № 3-1(57). – С. 84-94. – DOI 10.37220/МИТ.2022.57.3.011.
13. Влияние внешних факторов на технологическую систему высокоточного станка в условиях плавучих мастерских / Е. В. Хекерт, Е. А. Владецкая, С. М. Братан, А. О. Харченко // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2021. – № 2-4(52). – С. 33-37. – DOI 10.37220/МИТ.2021.52.2.066.
14. Владецкая, Е. А. Перспективы повышения качества обработки при шлифовании в плавучей мастерской / Е. А. Владецкая // *Эксплуатация морского транспорта*. – 2020. – № 1(94). – С. 118-124. – DOI 10.34046/aumsuomt94/19.
15. Bratan S., Roshchupkin S., Chasovitina A. The correlation of movements in the technological system during grinding precise holes, 2021, *Materials Science Forum*, 1037 MSF, pp. 384-389. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.384
16. Kharchenko A., Chasovitina A., Bratan S. Modeling of regularities of change in profile sizes and wear areas of abrasive wheel grains during grinding. *Materials Today: Proceedings*, Volume 38, Part 4, 2021, pp. 2088-2091, DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.154.
17. Братан, С. М. Моделирование взаимосвязей между входными факторами и выходными показателями процесса внутреннего шлифования с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки / С. М. Братан, А. С. Часовитина // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 57-70. – DOI 10.17212/1994-6309-2023-25.1-57-70.
18. Влияние на вероятность удаления материала относительных вибраций абразивного инструмента и заготовки при чистовом шлифовании / С. М. Братан, С. И. Рощупкин, А. С. Часовитина, К. Гупта // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 33-47. – DOI 10.17212/1994-6309-2022-24.1-33-47.

References

1. Novoselov, Y. Patterns of Removing Material in Workpiece - Grinding Wheel Contact Area / Y. Novoselov, V. Bogutsky, L. Shron // *Procedia Engineering : International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017, Saint-Petersburg, 16–19 of may 2017 year*. – Saint-Petersburg: Elsevier Ltd, 2017. – P. 991-996. – DOI 10.1016/j.proeng.2017.10.583.
2. Kassen G., Werner G. Kinematische Kenngrößen des Schleifvorganges [Kinematic parameters of the grinding process]. *Industrie-Anzeiger = Industry scoreboard*, 1969, no. 87, pp. 91–95. (In German).
3. Malkin S., Guo C. *Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives*. New York, Industrial Press, 2008. 372 p. ISBN 978-0-8311-3247-7.
4. Hou Z.B., Komanduri R. On the mechanics of the grinding process. Pt. 1. Stochastic nature of the grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43, pp. 1579–1593. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00186-X.
5. Lajmert P., Sikora V., Ostrowski D. A dynamic model of cylindrical plunge grinding process for chatter phenomena investigation. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 148, pp. 09004–09008. DOI: 10.1051/mateconf/20181480900.
6. Leonesio M., Parenti P., Cassinari A., Bianchi G., Monn M. A time-domain surface grinding model for dynamic simulation. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 4, pp. 166–171. DOI: 10.1016/j.procir.2012.10.030.
7. Zhang N., Kirpitchenko I., Liu D.K. Dynamic model of the grinding process. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, vol. 280, pp. 425–432. DOI: 10.1016/j.jsv.2003.12.006.
8. Jung J., Kim P., Kim H., Seok J. Dynamic modeling and simulation of a nonlinear, non-autonomous grinding system considering spatially periodic waviness on workpiece surface. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 2015, vol. 57, pp. 88–99. DOI: 10.1016/j.simpat.2015.06.005.
9. Yu H., Wang J., Lu Y. Modeling and analysis of dynamic cutting points density of the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 86, pp. 1933–1943. DOI: 10.1007/s00170-015-8262-0.
10. Guo J. Surface roughness prediction by combining static and dynamic features in cylindrical traverse grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 75, pp. 1245–1252. DOI: 10.1007/s00170-014-6189-5.
11. Soler Ya.I., Le N.V., Si M.D. Influence of rigidity of the hardened parts on forming the shape accuracy during flat grinding. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, p. 01076. DOI: 10.1051/mateconf/201712901076.

12. Ekaterina A. Vladetskaya, Sergey M. Bratan, Alexander O. Kharchenko, Evgeniy V. Hekert, Dynamics of vibration effects on a grinding machine in a floating workshop, taking into account sea waves, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 84—93.
13. Oleg V. Vladetsky, Evgeniy V. Hekert, Ekaterina A. Vladetskaya, Alexander O. Kharchenko, Analysis of vibration resistance of machining technological equipment of a floating workshop in shipbuilding, Marine intellectual technologies. 2021. № 2 part 4. P. 15—22.
14. Ekaterina A. Vladetskaya, Prospects for improving the quality of processing when grinding in a floating workshop, Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2020. № 1(94). P. 118—125.
15. Bratan S., Roshchupkin S., Chasovitina A. The correlation of movements in the technological system during grinding precise holes, 2021, Materials Science Forum, 1037 MSF, pp. 384-389. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.384
16. Kharchenko A., Chasovitina A., Bratan S. Modeling of regularities of change in profile sizes and wear areas of abrasive wheel grains during grinding. Materials Today: Proceedings, Volume 38, Part 4, 2021, pp. 2088-2091, DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.154.
17. Bratan S.M., Chasovitina A.S. Simulation of the relationship between input factors and output indicators of the internal grinding process, considering the mutual vibrations of the tool and the workpiece. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) =Metal Working and Material Science, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 57–70. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-57-70. (In Russian).
18. Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Chasovitina A.S., Gupta K.. (2022). The effect of the relative vibrations of the abrasive tool and the workpiece on the probability of material removing during finishing grinding. Metal Working and Material Science. 24. 33-47. 10.17212/1994-6309-2022-24.1-33-47. (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 АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Братан Сергей Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация и технология машиностроения» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь 299053, ул. Университетская, 33, e-mail: bratan@gmail.com

Sergey M. Bratan, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Automation and Technology of Mechanical Engineering, Universitetskaya, 33 St., Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: bratan@gmail.com

Харченко Александр Олегович, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизация и технология машиностроения» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь 299053, ул. Университетская, 33, e-mail: khao@list.ru

Alexander O. Kharchenko, Ph.D. (Eng), Professor, Professor of the Department of Automation and Technology of Mechanical Engineering, Universitetskaya, 33 St., Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: khao@list.ru

Часовитина Анастасия Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Судовой энергетики и электрооборудования» Морского института имени вице-адмирала В.А. Корнилова - Филиала ФГБОУ ВО Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, г. Севастополь, ул. Героев Севастополя 11, корпус 8/22, e-mail: Chas_MSU@list.ru

Anastasiia S. Chasovitina, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Marine Power Engineering and Electrical Equipment of Vice Admiral Kornilov Maritime Institute – Sevastopol branch of FSFEI HE "ADMIRAL USHAKOV MARITIME STATE UNIVERSITY", Sevastopol, 11 Geroev Sevastopol St., building 8/22, Russian Federation, e-mail: Chas_MSU@list.ru

Владецкая Екатерина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Судовой энергетики и электрооборудования» Морского института имени вице-адмирала В.А. Корнилова - Филиала ФГБОУ ВО Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, г. Севастополь, ул. Героев Севастополя 11, корпус 8/22, e-mail: vladetski@gmail.com

Ekaterina A. Vladetskaya, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Marine Power Engineering and Electrical Equipment of Vice Admiral Kornilov Maritime Institute – Sevastopol branch of FSFEI HE "ADMIRAL USHAKOV MARITIME STATE UNIVERSITY" vladetski@gmail.com, Sevastopol, 11 Geroev Sevastopol St., building 8/22, Russian Federation, e-mail: vladetski@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 26.11.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 24.12.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 25.12.2025.

Научная статья

УДК 681.518:65.011.56

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.005>

Оценка эффективности и технология совершенствования управления строительством судовых заказов и судостроительного производства

Миклуш С.В.¹ miklush.sv@ashipyards.com, Алексеев А.В.² iapbgks@bk.ru,

¹Адмиралтейские Верфи, ²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье представлены принципы и технология совершенствования управления судостроительным производством по результатам строительства судовых заказов на основе качественно новой среды оценивания и визуализации системных показателей качества управления судостроительным производством. Представлена модель технологии цифрового мониторинга и управления судостроительным предприятием, включающая в себя регистрацию и мониторинг технологических процессов на основе технологий радио-частотной идентификации и машинного зрения с последующей обработкой получаемой информации в специализированном программном комплексе системы поддержки принятия управленческих решений строительством судовых заказов. Предложена технология, позволяющая моделировать и прогнозировать развитие технологических процессов строительства совокупности судовых заказов и на основе полимодального агрегирования их качества проводить системный анализ и проактивное управление с формированием количественно обоснованных проектов управленческих решений и их вариантной оптимизации. Предложенная концепция позволяет автоматизировать сложные производственные процессы судостроительного предприятия в части инструментального сбора информации о состоянии технологических процессов строительства судовых заказов и судостроительного предприятия в целом, минимизировать влияние человеческого фактора при планировании и оценке реализации проекта, повысить эффективность управления предприятием, минимизировать риск срыва сроков строительства судовых заказов и издержки производства.

Ключевые слова: технология, судостроительный заказ, судостроительное производство, цифровизация мониторинга и управления производством, планирование производственных процессов, поддержка принятия управленческих решений.

Для цитирования: Миклуш С.В., Алексеев А.В. Основы эффективной технологии цифровизации мониторинга и управления судостроительным производством, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 61—66. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.005.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.005>

Evaluation of efficiency and technology for improving the management of ship orders and shipbuilding production

Sergey V. Miklush¹, miklush.sv@ashipyards.com, Anatoly V. Alekseev² iapbgks@bk.ru

¹"Admiralty Shipyards", St. Petersburg, Russian Federation, ²St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation,

Abstract. The article presents the principles and technology of improving the management of shipbuilding production based on the results of the construction of ship orders based on a qualitatively new environment for evaluating and visualizing system indicators of the quality of shipbuilding production management. A model of digital monitoring and management technology for a shipbuilding enterprise is presented, which includes registration and monitoring of technological processes based on radio frequency identification and machine vision technologies, followed by processing of the information received in a specialized software package of the management decision support system for the construction of ship orders. A technology is proposed that makes it possible to model and predict the development of technological processes for the construction of a set of ship orders and, based on polymodal aggregation of their quality, to conduct a systematic analysis and proactive management with the formation of quantitatively sound projects of management decisions and their variant optimization. The proposed concept makes it possible to automate complex production processes of a shipbuilding enterprise in terms of instrumental collection of information on the state of technological processes for the construction of ship orders and the shipbuilding enterprise as a whole, minimize the influence of the human factor in planning and evaluating project implementation, increase the efficiency of enterprise management, minimize the risk of disruption in the construction of ship orders and production costs.

Keywords: technology, shipbuilding order, shipbuilding production, digitalization of production monitoring and management, planning of production processes, support for management decision-making.

For citation: Sergey V. Miklush, Anatoly V. Alekseev, Evaluation of efficiency and technology for improving the management of ship orders and shipbuilding production, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 61—66. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.005.

Введение

Современное судостроение находится в активной фазе внедрения концепции «Индустрия 4.0». Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28.10.2019 № 2553-р «Об утверждении Стратегии развития судостроительной промышленности на период до 2035 года» отводит существенную роль цифровой трансформации отрасли [1]. Формируются проекты типа «Цифровая верфь» [2], внедряющие цифровые решения во многие направления деятельности судостроительных предприятий. Широкое распространение получили всевозможные цифровые продукты для производственной сферы деятельности судостроительных предприятий: MES (Manufacturing Execution System) системы управления производственными процессами, EPR (Enterprise Resource Planning) системы планирования ресурсов предприятия, OLAP (OnLine Analytical Processing) системы поддержки принятия решений и аналитическое обеспечение руководителей, системы управления проектами [3].

Данные системы позволяют достаточно успешно осуществлять планирование и контроль продвижения технологических процессов серийных производств. Но в судостроении, где в основном преобладает мелкосерийный выпуск с большим количеством разнородных технологических процессов (ТП), и зачастую разработка РКД (рабоче-конструкторской документации) производится с задержками, в следствии чего приходится выполнять опережающий запуск заказа в производство, возникают трудности в адекватной оценке хода строительства судового заказа (СЗ). Также возникают трудности в прогнозировании влияния составных ТП на успешность выполнения всего проекта в целом на дату окончания строительства. Это порождает неритмичность и критичность в работе судостроительного предприятия (СП). В этой связи, для совершенствования процессов управления строительством судовых заказов и СП с использованием возможностей современных информационных технологий возникает необходимость создания качественно новой (минимизирующей влияние человеческого фактора, использующей средства объективного контроля, заблаговременно прогнозирующей, визуализирующей и минимизирующей критические риски строительства СЗ и СП в целом, инициализирующей эффективные варианты управленческих решений) среды оценивания и визуализации системных показателей СП. Данная среда должна включать как информацию о состоянии, текущих и прогнозируемых результатах реализации производственных процессов в реальном режиме времени (с их детализацией по ключевым процессам), так и позволять оценивать эффективность выполнения производственной программы строительства каждого проекта (судна) и всей производственной программы СП в целом.

Предлагаемое решение

Для совершенствования технологии мониторинга и управления СП предлагается решить следующие сравнительно новые задачи:

1. Ввести инструментальный контроль и регистрацию выполнения ТП в реальном режиме времени, что позволит минимизировать, а в ряде случаев исключить негативное влияние человеческого фактора на эффективность управления строительством СЗ и СП в целом.

Для решения этой задачи необходимо предусмотреть систему автоматической регистрации выполнения операций ТП, которая позволяла бы идентифицировать производственные процессы и фиксировать их продвижение.

Предлагается реализовать построение данной системы на основе технологии автоматической радиочастотной идентификации (РЧИ-технологии) и технологии машинного зрения с элементами искусственного интеллекта [4] в части автоматического распознавания образов и повышения достоверности идентификации результатов выполнения технологических процессов.

Комбинация двух технологий, по нашим оценкам, позволит повысить достоверность получаемых данных до уровня 0,90...0,95 и минимизировать поток ошибочных автоматических решений до значений порядка 1...2 в производственную смену.

2. Ввести процедуру цифрового мониторинга и прогнозирования в реальном режиме времени *за счет* использования технологии цифрового двойника типа [5-7], реализующей в режиме «цифровой тени» непрерывную оценку и контроль успешности выполнения СЗ на дату его завершения [5, 8] на основе данных, получаемых от системы автоматической регистрации (по п.1) в составе специального программного комплекса системы поддержки принятия управленческих решений строительством судовых заказов (ПК «СПРУ-СП»), реализующего задачи:

- визуализации по данным от программного комплекса системы поддержки принятия управленческих решений строительства судового заказа (ПК «СПРУ-СЗ») [5, 8] фактического уровня выполнения плана строительства каждого СЗ на текущий момент времени, а также ожидаемого уровня выполнения СЗ на дату его завершения с полимодельной визуализацией и оценкой по сценарию Парето «20/80», форсированного развития «20/50» и реального упреждающего (проактивного) управления «10/20»;

- аналогичной цифровой оценки и непрерывной визуализации (мониторинга) интегрального (агрегированного) показателя качества выполнения совокупности СЗ предприятием на текущий момент времени, а также ожидаемого уровня выполнения СЗ на дату его завершения;

- интеллектуального анализа выше названных и визуализируемых данных с синтезом вариантов управленческих решений на основе распознавания «ситуационных образов» развития обстановки, их классификации, идентификации и выбора соответствующих проектов управленческих решений в базе данных знаний (из числа накапливаемых и непрерывно актуализируемых в процессе эксплуатации ПК «СПРУ-СП»);

- автоматической регистрации принятых решений оператором СП (диспетчером предприятия) из множества выше представленных;

- автоматической рассылки руководителям строительства СЗ распоряжений диспетчера СП в соответствии с каждым принятым решением;
- автоматической регистрации данных, поступающим от исполнителей СЗ по реализации полученных распоряжений (квитирование);
- автоматического анализа данных по реализации принятых решений и инициация (при необходимости) корректирующих решений;
- автоматической оценки и регистрация качества управления руководителями по алгоритму

$$Q_y = \frac{N_p}{(N_p + N_k + N_{op})}, \quad (1)$$

где: N_p – общее число реализованных за производственную смену решений при условии выполнения плановых (заданных) уровней выполнения СЗ (для исполнителей СЗ) и их совокупности по СП (для диспетчера СП); N_k – общее число корректирующих (дополнительных) за производственную смену решений при условии выполнения плановых (заданных) уровней выполнения СЗ и их совокупности по СП; N_{op} – общее число отмененных (снятых, неэффективных) за производственную смену решений при условии выполнения плановых (заданных) уровней выполнения СЗ и их совокупности по СП.

При условии невыполнения заданных уровней выполнения СЗ и СП типа $Q_y = (80...90)\%$ качество управления соответствующими руководителями целесообразно считать неэффективным.

3. Ввести в дополнение к принятым на производстве унифицированную по СП и СЗ процедуру формирования цифрового представления о степени продвижения строительства и оценки эффективности/успешности реализации СЗ систему критериев в соответствии с [7, 8] в составе:

- интегральный (обобщенный, агрегированный) показатель качества (АПК) на основе свертки
- системных показателей качества (СПК) по каждому СЗ в результате агрегирования
- частных показателей качества (ЧПК) по всем ТП, входящим в процесс постройки [5].

Введение данной унифицированной по предприятию процедуры позволит в едином информационно-понятийном пространстве системно оценивать (моделировать) и прогнозировать результативность (успешность) строительства СЗ и заказа СП в целом на заданный срок его сдачи заказчику и с заданным качеством.

4. Ввести процедуру проактивного управления СЗ и СП по представляемым данным прогнозирования, для чего формируются соответствующие альтернативные варианты (предложения) для поддержки принятия решений (корректирующих решений) руководителями строительства всех уровней.

В зависимости от содержания, значимости и данных в квалиметрической базе данных и знаний (КБДЗ) по исполнителям работ в качестве типовых вариантов проектов решений в составе ПК «СПРУ-СП», например, могут быть:

- 90%...100% успешности завершения процесса (решаемой задачи) с заданным качеством и в назначенный срок. Проект решения: «Управление – эффективное. Рекомендуется действовать по плану»;
- 80%...90% успешности завершения СЗ или СП. Проект решения: «Угроза невыполнения требований предприятия. Рекомендуется при необходимости запросить конкретную помощь»;
- 50%...80% успешности завершения СЗ или СП. Проект решения: «Невыполнение требований предприятия. Предупредить руководителя СЗ или СП о НСС (не полном служебном соответствии). Выполнение требований предприятия взять под личный контроль. Рассмотреть возможность внешней поддержки управления»;
- менее 50% успешности завершения СЗ или СП. Проект решения: «Невыполнение требований. Передать управление (ФИО)».

В графическом виде модель технологии цифровизации мониторинга и управления строительством судового заказа (ТЦМУ СЗ), реализующая данные требования, представлена на рисунке 1.

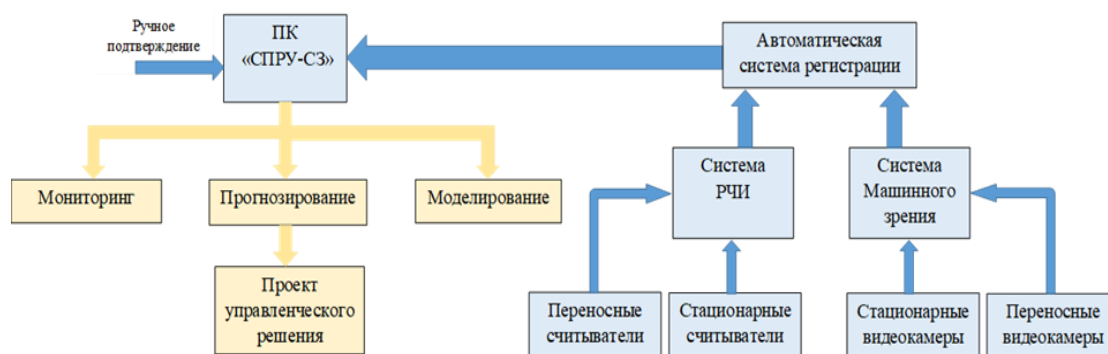


Рис. 1. Структурно-функциональная модель ТЦМУ СЗ, реализуемая в ПК «СПРУ-СЗ»

На рисунке 2 представлена модель технологии цифровизации мониторинга и управления судостроительным производством ТЦМУ СП с главной экранной формой ПК «СПРУ-СП». Рассмотрим вербальную модель функционирования СП по предложенной технологии при строительстве судового заказа. Процесс постройки судового заказа предлагается рассматривать в объеме соответствующих построечных (ПУ) и швартовых

удостоверений (ШУ). Каждое удостоверение включает в себя определенный набор технологической документации (чертежей, схем, методик испытаний и т.п.) по выполнению ТП с последующим предъявлением работ заказчику и классификационным обществам, которые в совокупности определяют всю номенклатуру и комплекс требований к постройке судового заказа.



Рис. 2. Структурно-функциональная модель ТЦМУ СП и вариант главной экранной формы ПК «СПРУ-СП»

Все составные изделия, устройства, приборы в соответствии с чертежом или схемой, имеет свой уникальный индекс, по которому его можно идентифицировать. Система регистрации на основе технологий РЧИ и Машинного зрения фиксирует продвижение ТП в объеме соответствующих ПУ и ШУ и передает информацию в ПК «СПРУ-СЗ», где производится визуализация процесса строительства по группам ТП и по каждому ПУ, ШУ с прогнозированием и оценкой влияния каждого ТП на процесс строительства всего заказа в целом на дату окончания [6]. В случае невозможности использования автоматизированных методов съема данных для мониторинга предусмотрен ручной ввод подтверждения выполнения задачи, с обязательным использованием цифровой подписи или цифрового ключа ответственного исполнителя.

Для системного анализа и моделирования процессов и качества строительства СЗ и их множества на СП выбран полимодельный метод агрегирования критериев качества, позволяющий оценивать системные показатели качества выполнения СЗ и функционирования СП в целом при значительно меньших методических погрешностях других методов многокритериального оценивания [7].

Для определения АПК по группе критериев используется типовой оператор свертки этих критериев по гармоническому алгоритму, как наиболее предпочтительному из возможных:

$$C_{g,N}^{\Gamma} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (w_n * q_n)} * \prod_{n=1}^N (q_n^{w_n}), \quad (2)$$

где w_n - индекс критериальной значимости (ИКЗ) соответствующего показателя качества q_n , N - их количество.

При не достижении предустановленных уровней продвижения по отдельным производственным процессам или группам, влияющих на выполнение конечного результата строительства заказа в установленные сроки, активируется предупредительная сигнализация и представляются соответствующие рекомендации по принятию корректирующих управленческих действий.

Для прогнозирования конечной результативности ТП и оценки текущего значения степени продвижения строительства реализованы следующие варианты числового моделирования сценариев развития процессов строительства СЗ и СП [8]:

- линейная модель, рассматривает равномерное развитие процессов во времени;

- модель развития, реализующая принцип Парето, определяющий, что за первые 20% времени, отведенного для производственного процесса,

выполняется 80% от запланированного объема работ и достигаемого результата;

- модель форсированного развития, определяет, что за первые 20% времени, отведенного для производственного процесса, выполняется 50% от запланированного объема работ и достигаемого результата;

- модель реального опережающего развития, за первые 10% времени, отведенного для производственного процесса, выполняется 20% от запланированного объема работ и достигаемого результата.

Предложенные варианты моделей и возможность их выбора позволяет для каждого ТП подобрать наиболее предпочтительную по достигаемому результату модель развития процесса для повышения эффективности прогнозирования и управления сложными производственными процессами.

Предложенный подход и оценка эффективности строительства СЗ и их совокупности по СП на основе технологии цифрового мониторинга и управления судостроительным производством с регистрацией продвижения ТП в ПК «СПРУ-СЗ» и последующим вычислением значений ЧПК, ГПК и АПК в ПК «СПРУ-СП» позволяет путем сопоставления получаемых значений с заданными требованиями непрерывно и количественно оценивать не только качество выполнения процедур по каждому СЗ, но и эффективность реализации их совокупности в целом по СП. В целом это позволяет, по нашему мнению, с учетом приведенных данных, существенно повысить качество управления судостроительным предприятием.

Вывод

Предложенная концепция ТЦМУ СП позволяет систематизировать процесс мониторинга и управления строительством судовых заказов, посредством автоматизации технологических процессов строительства СЗ в части сбора информации о нахождении составных изделий, комплектующих, приборов и оборудования судовых систем и конструкций, входящих в определённые комплексы ТП, автоматизации мониторинга системных показателей продвижения работ по каждому производственному процессу и позволит минимизировать негативное влияние субъективных свойств операторов (так называемого «человеческого фактора»).

Получаемые при этом новые возможности, в свою очередь, дают основание для формирования

обоснованных предложений по принятию предприятия во избежание срывов сроков эффективных управленческих решений для всех строительства судовых заказов и минимизации уровней руководства судостроительного издержек в производстве.

Литература

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации «Об утверждении Стратегии развития судостроительной промышленности на период до 2035 года» от 28.10.2019 № 2553-р.
2. Середохо В. А., Макеев С. М. Проект «Цифровая верфь»: создание экосистемы предприятия для развития цифрового производства. Инновации № 9 (251), 2019, с. 19 - 22
3. Соломенцев Ю.М., Загидуллин Р.Р., Фролов Е.Б. Планирование в современных системах управления производством. Информационные технологии и вычислительные системы 4/2010, с 77-87
4. Миклуш С. В., Миклуш В. А., Татарникова Т. М. Применение технологии RFID в системе мониторинга и управления сложными производственными процессами судостроительного предприятия. Успехи современной радиоэлектроники № 8, 2023, с. 11-17
5. Миклуш С. В. Концепция модели цифровизации управления производственными процессами по системным показателям качества. Материалы конференции СПОИСУ. – СПб, 2024. – С. 326-328
6. Александров В. Л., Миклуш С.В., Алексеев А.В. Концепция развития судостроительного предприятия на основе интеграции производственных процессов по системному критерию качества. Седьмая международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем (ИКМ МТМТС-2023)», труды конференции. – С 148-155
7. Алексеев А.В. Модель инвариантной оценки качества и эффективности объектов морской техники. Морские интеллектуальные технологии. № 2 том 2, 2020/№ 2 part 2, 2020, с. 53-60
8. Миклуш С. В. Анализ вариантов числового моделирования и исследовательского проектирования систем автоматизации организационно-технического мониторинга строительства судостроительного заказа в защищенном исполнении. Региональная информатика и информационная безопасность: Сборник трудов Санкт-Петербургской международной конференции 2023 года. Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления, 2023, с. 266-269

References

1. Decree of the Government of the Russian Federation "On approval of the Strategy for the Development of the Shipbuilding Industry for the period up to 2035" dated 28.10.2019 No. 2553-R.
2. Seredokho V. A., Makeev S. M. The Digital Shipyard project: creating an enterprise ecosystem for the development of digital production. Innovations No. 9 (251), 2019, pp. 19-22
3. Solomentsev Yu.M., Zagidullin R.R., Frolov E.B. Planning in modern production management systems. Information Technology and Computing Systems 4/2010, p 77-87
4. Miklush S. V., Miklush V. A., Tatarnikova T. M. Application of RFID technology in the system of monitoring and management of complex production processes of a shipbuilding enterprise. Successes of Modern Radio electronics No. 8, 2023, pp. 11-17
5. Miklush S. V. The concept of the digitalization model of production process management based on system quality indicators. Materials of the SPOISU conference. – St. Petersburg, 2024. – pp. 326-328
6. Alexandrov V. L., Miklush S.V., Alekseev A.V. The concept of development of a shipbuilding enterprise based on the integration of production processes according to a system quality criterion. The seventh International Scientific and practical conference "Simulation and integrated modeling of marine equipment and marine transport systems (ICM MTMTS-2023), proceedings of the conference. – С 148-155
7. Alekseev A.V. A model of invariant assessment of the quality and efficiency of marine engineering facilities. Marine intelligent technologies. No. 2 volume 2, 2020/No. 2 part 2, 2020, pp. 53-60
8. Miklush S. V. Analysis of numerical modeling options and research design of automation systems for organizational and technical monitoring of the construction of a shipbuilding order in a secure design. Regional Informatics and Information Security: Proceedings of the St. Petersburg International Conference in 2023. St. Petersburg Society of Informatics, Computer Technology, Communication and Control Systems, 2023, pp. 266-26.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Миклуш Сергей Владимирович, начальник отдела, АО «Адмиралтейские верфи», 190121, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанка, 203, e-mail: miklush.sv@ashipyards.com

Sergey V. Miklush, Head of Department, Admiralty Shipyards JSC, 203 Fontanka River Embankment, Saint Petersburg, 190121, e-mail: miklush.sv@ashipyards.com

Алексеев Анатолий Владимирович, профессор Кафедры судовой автоматики и измерений Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, д.т.н., профессор. 190121, Санкт-Петербург, ул. Лотманская, д. 3, e-mail: iapbgks@bk.ru.

Anatoly V. Alekseev, Professor of the Department of Marine Automation and Measurements of St. Petersburg State Maritime Technical University, Doctor of Technical Sciences, Professor. 3 Lotsmanskaya Street, Saint Petersburg, 190121, e-mail: iapbgks@bk.ru .

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.07.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.01.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 23.01.2026.

Научная статья

УДК: 629.5.081, 629.5.083

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.006>

Параметрическое и временное прогнозирование показателей систем технического обеспечения строительства судов в обеспечение повышения эффективности судостроительного производства

Герман Г.В.¹ germangalina@yandex.ru, Попов С.В.² svpopoff@mail.ru, Иванова В.А.² avdyunina@list.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ²НИПТБ «Онега»

Аннотация. Вопросы внедрения наукоемких технологий, обеспечения безопасности, повышения производительности труда, сокращения сроков и стоимости строительства судов обсуждаются на тематических конференциях, при этом направление технического обеспечения строительства обходится стороной. В зависимости от вида и продолжительности работ с судном на разных предприятиях трудоемкость изготовления и обслуживания систем технического обеспечения может составлять до 9 % от трудоемкости всех выполняемых работ. В статье представлена совокупность методических подходов получения оценок показателей систем технического обеспечения строительства в зависимости от классификационных характеристик судов. В качестве исходных данных принята статистика по проектам систем технического обеспечения строительства судов, прошедших в АО «НИПТБ «Онега» экспертизу на соответствие требованиям пожарной безопасности с 2013 по 2024 годы. В результате исследования рассчитаны математические модели оценки показателей систем технического обеспечения строительства судов на основе параметрических и временных зависимостей, удовлетворяющих всем статистическим критериям. Полученные результаты позволяют прогнозировать и планировать создание систем технического обеспечения строительства судов в рамках реализации «Стратегии развития судостроительной промышленности на период до 2035 года и на дальнейшую перспективу до 2050 года», а также разработать мероприятия по сокращению сроков и стоимости строительства судов, повышения качества проектирования и безопасности проведения работ.

Ключевые слова: техническое обеспечение строительства судов, модель, параметрическая, временная, прогнозирование

Для цитирования: Герман Г.В., Попов С.В., Иванова В.А. Параметрическое и временное прогнозирование показателей систем технического обеспечения строительства судов в обеспечение повышения эффективности судостроительного производства Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 67—78. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.006.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.006>

Parametric and temporary forecasting of indicators of technical maintenance systems for ship under construction to ensure an increase in the efficiency of shipbuilding production facilities

Galina V. German¹ germangalina@yandex.ru, Sergey V. Popov² svpopoff@mail.ru,

Viktoriya A. Ivanova² avdyunina@list.ru

¹St. Petersburg State Marine Technical University, Russian Federation, ²NIPTB Onega, Severodvinsk, Arkhangelsk region, Russian Federation

Abstract. The issues of introducing high-tech technologies, ensuring safety, increasing labor productivity, and reducing the time and cost of ship construction are discussed at thematic conferences, while the direction of technical support for construction is kept at distance. Depending on the type and duration of work with the vessel at different enterprises, the complexity of manufacturing and maintaining maintenance systems can be up to 9% of the complexity of all work performed. The article presents a set of methodological approaches for obtaining estimates of indicators of technical support systems for construction, depending on the classification characteristics of ships. Statistics on the projects of technical support systems for the construction of ships that were examined by Onega NIPTB JSC for compliance with fire safety requirements from 2013 to 2024 were used as initial data. As a result of the research, mathematical models have been calculated for evaluating indicators of ship construction maintenance systems based on parametric and time dependencies that meet all statistical criteria. The results obtained make it possible to predict and plan the creation of technical support systems for the construction of ships as part of the implementation of the "Strategy for the Development of the Shipbuilding Industry till 2035 and beyond 2050", as well as to develop measures to reduce the time and cost of ship construction, improve the quality of design and safety of work.

Key words: technical maintenance for ship under construction, model, parametric, temporary, forecasting

For citation: Galina V. German, Sergey V. Popov, Viktoriya A. Ivanova. Parametric and temporary forecasting of indicators of technical maintenance systems for ship under construction to ensure an increase in the efficiency of shipbuilding production facilities. Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 67—78. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.006.

Введение

Современное судостроение – высокотехнологичная отрасль, где ключевыми факторами конкурентоспособности являются безопасность и эффективность производства [1]. Растущий спрос на строительство судов, наблюдаемый в последние годы, требует интенсификации строительства и поиска новых технологических решений без ущерба для качества, безопасности и надежности.

Сокращение сроков строительства судна неизменно связано с ростом негативных факторов: возможный риск снижения качества; дополнительные затраты, связанные с повышением требований по обеспечению безопасных условий труда; нехватка квалифицированных кадров; сложности с поставками. Обеспечение безопасности и сокращение сроков строительства – взаимосвязанные задачи, которые могут и должны решаться с применением специального математического аппарата.

Темы внедрения наукоемких технологий, обеспечения безопасности работ, повышения производительности труда, сокращения сроков строительства судов постоянно обсуждаются на тематических конференциях [2, 3] в научном сообществе [4–6] и среди предприятий судостроительной промышленности, а вот вопросы, связанные с техническим обеспечением строительства судов (далее – ТОС), обходятся стороной.

Системы ТОС – специализированные системы, прокладываемые от пункта подключения вне судна до потребителя на судне [7] и обеспечивающие:

- снабжение технологических и штатных потребителей на судне всеми необходимыми видами энергии и средами для выполнения технологических операций;

- создание безопасных условий труда и обеспечения пожарной, экологической, радиационной безопасности при строительстве судов на построечных местах.

Результаты расчетов трудоемкости изготовления и обслуживания систем ТОС учитываются в рамках расчета стоимости строительства судна в целом. На разных верфях сложились свои подходы к изготовлению и обслуживанию систем ТОС, а также к применению норм судостроительных работ, которые используются для расчета трудоемкости, поэтому значения трудоемкости изготовления и обслуживания ТОС для различных предприятий будут отличаться.

В зависимости от вида и продолжительности работ с судном (строительство, ремонт, модернизация) на разных предприятиях трудоемкость изготовления и обслуживания систем ТОС по различным данным может составлять от 2 до 9 % от трудоемкости всех выполняемых работ. Таким образом, вопросы планирования создания систем ТОС, сокращения сроков и стоимости, повышения качества их проектирования, изготовления и обслуживания являются актуальными.

Анализ исходных данных по системам ТОС

В статье приведены результаты исследования, включающие выявление номенклатуры показателей

систем ТОС (количества систем, количества выявленных ошибок и др.) и параметров (классификационных характеристик) судов, обеспечивающей оценку и прогноз показателей на основе достоверных параметрических и временных моделей оценки, использующих определяющие параметры, известные на этапах принятия технических, конструктивно-технологических, организационных и плановых решений по обеспечению качественного выполнения работ.

В качестве исходных данных для исследования принята статистика по проектам систем ТОС, прошедших в АО «НИПТБ «Онега» экспертизу на соответствие требованиям пожарной безопасности с 2013 по 2024 годы [8].

Для выявления ошибок при проектировании были выбраны слаботочные системы ТОС (пожарная сигнализация, телефонная связь и др.), поскольку они являются определяющими в обеспечении пожарной безопасности при проведении работ с судном.

При проведении исследования использованы методологические основы, представленные в публикациях [9–15].

Исходные данные по системам ТОС представлены в таблице 1 по форме [10].

Требования к заполнению таблицы исходных данных:

- таблица должна иметь полный ранг, т.е. не иметь пропусков данных. Интерполяция и экстраполяция данных не допускается;

- номенклатура показателей и параметров, включенных в таблицу, не ограничивается;

- декомпозиция показателей y_1 , y_2 , y_3 , ... определяется потребностью в получении оценок.

Анализ исходных данных позволил выделить первоначальную номенклатуру показателей и параметров для дальнейшего выявления среди них определяющих [9], а также проверки допустимости использования и синтеза моделей оценки. Первоначальная номенклатура оценок включает:

- y_1 – количество систем ТОС, созданных для одного судового заказа;

- y_2 – количество слаботочных систем ТОС, созданных для одного судового заказа;

- y_3 – количество замечаний по слаботочным системам ТОС;

- $y_4 = y_2/y_1$ – относительный показатель систем ТОС;

- $y_5 = y_3/y_1$ – относительный показатель количества замечаний.

Оценка (прогноз) показателей систем ТОС должна опираться на классификационные характеристики судов, кораблей и изделий морской техники (далее – ИМТ), известные на момент разработки технических заданий на проектирование, и текущее время создания проектов систем ТОС. Такими характеристиками являются:

- x_1 – водоизмещение судов порожнем, т;

- x_2 – ширина судна, м;

- x_3 – длина судна, м;

- x_4 – высота борта, м;

- x_5 – глубина осадки, м;

- t_n – год создания проекта системы ТОС.

От указанных характеристик судов (основных размеров) напрямую зависят показатели систем ТОС (количество систем, протяженность кабельных

трасс, количество устанавливаемого оборудования), в то время как другие характеристики, например, мощность главной энергетической установки, класс автоматизации судна, имеют опосредованное влияние и в большей степени определяют показатели штатных судовых систем.

На этапе проектирования судна его основные размерения известны, доступны для анализа и достаточны для определения связей с показателями систем ТОС.

Таблица 1

Исходные данные по системам ТОС

Номер объекта наблюдения <i>i</i>	Проект	Значения показателей систем ТОС					Значения классификационных характеристик судов, кораблей и ИМТ					Год создания проекта системы ТОС
		<i>y</i> ₁	<i>y</i> ₂	<i>y</i> ₃	<i>y</i> ₄	<i>y</i> ₅	<i>x</i> ₁	<i>x</i> ₂	<i>x</i> ₃	<i>x</i> ₄	<i>x</i> ₅	<i>t</i> _н
Подгруппа 1												
1	Плавдок 1	47	7	17	0,15	2,43	20 000	191,0	43,7	26,9	24,00	2014
2	Понтон 1	27	6	0	0,22	0	3 164	93,2	27,4	7,8	1,54	2018
3	Корабль 1	42	4	15	0,09	3,75	2 140	106,5	13,0	33,0	7,76	2021
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
n	Спасательное судно 1	24	3	7	0,13	2,33	6 350	90,7	19,8	9,0	6,30	2024
Подгруппа 2												
1	Тральщик 1	6	2	0	0,33	0	162	32,4	6,9	-	1,70	2014
2	Спасательное судно 2	33	3	0	0,09	0	7 200	111,0	24,0	-	-	2018
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
n	Траулер 1	27	3	10	0,11	3,33	13 000	121,0	21,6	-	-	2021
Подгруппа 3.1												
1	Плавкран 1	32	4	1	1,13	0,03	-	64,8	25,8	5,4	2,67	2018
2	Плавкран 2	32	4	7	1,13	0,22	-	74,2	32,6	6,5	2,99	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
n	Паром 1	17	2	17	0,12	1	-	131	20,3	14,8	6,60	2019
Подгруппа 3.2												
1	Танкер 1	42	5	19	0,12	0,45	-	249,9	44	-	15,00	2019
2	Пассажирское судно 1	40	6	0	0,15	0	-	68,0	15,5	-	3,80	2019
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
n	Пассажирское судно 2	44	6	2	0,14	0,05	-	68,0	15,5	-	3,80	2020

Методические подходы для оценки предложенных числовых показателей систем ТОС выдвигают требование достоверности, низкой погрешности и адекватности условиям производства работ при реализации систем ТОС в соответствии с рядом источников [9–11]. Методологические подходы в получении числовых оценок параметров и показателей судостроительной отрасли предложены в работах [9–14] для использования в процессе технической подготовки производства.

Необходимость системного подхода требует не только формулирования целевой функции проблемы, как указано выше, но и создания взаимоувязанной системы оценок параметров и показателей систем ТОС для разработки методов, алгоритмов и достоверных моделей оценки и прогноза (параметрического и временного) на основе установленных связей.

Создание такой системы, сформулированное в работе [9], требует выявления из всего многообразия определяющих параметров, наиболее тесно связанных с искомыми показателями, для чего разработаны и реализованы два методических подхода:

- корреляционно-регрессионный анализ (далее – КРА) [10];

- метод главных компонент (далее – МГК) [11].

Предложенный показатель y_3 носит случайный характер и требует для получения оценок реализации метода имитационного моделирования Монте-Карло [9, 15].

Временной прогноз значений показателей (абсолютных, удельных) предложен в статье [14], метод сокращения установочной методической погрешности изложен в статье [12].

Использование предложенных методических подходов обеспечивает разработку взаимоувязанных моделей оценки показателей систем ТОС, удовлетворяющих статистическим критериям несмещенности, эффективности, статистической значимости и низкой погрешности [9, 10, 13].

Алгоритмы, методические подходы и математические модели получения оценок показателей систем ТОС

Предварительный анализ исходных данных позволил выполнить декомпозицию базы данных систем ТОС на следующие подгруппы:

- подгруппа 1: $y_1, y_2, y_4 = f(x_1, x_2, \dots, x_5, t_n)$;
- подгруппа 2: $y_1, y_2, y_4 = f(x_1, x_2, x_3, t_n)$;
- подгруппа 3:
 - 1) $y_1, y_2, y_4 = f(x_2, x_3, x_4, x_5, t_n)$ – подгруппа 3.1;
 - 2) $y_1, y_2, y_4 = f(x_2, x_3, x_5, t_n)$ – подгруппа 3.2.

Декомпозиция на подгруппы обусловлена однородностью массивов исходных данных (наличием всех характеристик для каждой подгруппы, согласно таблице 1), что в дальнейшем позволило получить высокие парные коэффициенты корреляции и разработать достоверные математические модели.

Оценка и анализ связей показателей и параметров систем ТОС

Анализ связей показателей и параметров систем ТОС выполнен на основе расчета и оценки значений парных коэффициентов корреляции [10]

$$r_{y_j x_j} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{ji} - \bar{y}_j) \cdot (x_{ji} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{ji} - \bar{y}_j)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{ji} - \bar{x}_j)^2}}, \text{ при } j = 1, 2, \dots, 5, \quad (1)$$

где $\bar{y}_j$ и $\bar{x}_j$ – средние значения показателей и параметров систем ТОС, определяемые по формулам

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_{ji}, \text{ при } j = 1, 2, \dots, 5, \quad (2)$$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_{ji}, \text{ при } j = 1, 2, \dots, 5, \quad (3)$$

Значения $|r_{y_j x_j}|$ лежат в пределах $0 \leq |r_{y_j x_j}| \leq 1$:

- при условии $0,8 \leq |r_{y_j x_j}| \leq 1,0$ связь показателей y_j

и параметров x_j сильная, возможен расчет линейной регрессионной зависимости оценки показателя систем ТОС вида

$$\hat{y}_j = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 \cdot x_j, \quad (4)$$

где $\hat{y}_j$ – оценка показателя y_j ;

$\hat{b}_0, \hat{b}_1$ – оценки коэффициентов однопараметрической модели линейной регрессии;

- при условии $0,4 \dots 0,6 \leq |r_{y_j x_j}| \leq 0,8$ связь показателей y_j и параметров x_j – на фоне ошибки, требуется подбор наилучшей нелинейной модели множественной регрессии вида, например,

$$\hat{y}_j = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 \cdot x_j + \hat{b}_2 \cdot x_j^2. \quad (5)$$

Возможна разработка многопараметрической линейной модели вида

$$\hat{y}_j = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 \cdot x_1 + \hat{b}_2 \cdot x_2; \quad (6)$$

- при условии $0 \leq |r_{y_j x_j}| \leq 0,4$ связь слабая, имеет место ошибка или нелинейность, расчет модели невозможен.

Результаты анализа рассчитанных значений парных коэффициентов корреляции и графиков функциональных зависимостей параметров от показателей систем ТОС, которые представлены в таблицах 2–6 и на рисунках 1–4, привели к необходимости разработки моделей вида (4)–(6).

Таблица 2

Базовая матрица парных коэффициентов корреляции для подгруппы 1 по показателю y_1

	y_1	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
y_1	1	0,4478	0,7263	0,3378	0,6829	0,6505
x_1	0,4478	1	0,5956	0,6493	0,2833	0,4629
x_2	0,7263	0,5956	1	0,4182	0,2196	0,3757
x_3	0,3378	0,6493	0,4182	1	0,1197	0,5369
x_4	0,6829	0,2833	0,2196	0,1197	1	0,6117
x_5	0,6505	0,4629	0,3757	0,5369	0,6117	1

Таблица 3

Базовая матрица парных коэффициентов корреляции для подгруппы 2 по показателю y_1

	y_1	x_1	x_2	x_3
y_1	1	-0,1042	0,4661	0,6119
x_1	-0,1042	1	0,2131	0,1736
x_2	0,4661	0,2131	1	0,9864
x_3	0,6119	0,1736	0,9864	1

Таблица 4

Базовая матрица парных коэффициентов корреляции для подгруппы 2 по показателю y_4

	y_4	x_1	x_2	x_3
y_4	1	0,0750	-0,5738	-0,6613
x_1	0,0750	1	0,2131	0,1736
x_2	-0,5738	0,2131	1	0,9864
x_3	-0,6613	0,1736	0,9864	1

Таблица 5

Базовая матрица парных коэффициентов корреляции для подгруппы 3.1 по показателю y_1

	y_1	x_2	x_3	x_4	x_5
y_1	1	-0,8059	0,2031	-0,0929	-0,3302
x_2	-0,8059	1	0,1435	0,0903	0,1991
x_3	0,2031	0,1435	1	0,0643	0,6432
x_4	-0,0929	0,0903	0,0643	1	0,1062
x_5	-0,3302	0,1991	0,6432	0,1062	1

Таблица 6

Базовая матрица парных коэффициентов корреляции для подгруппы 3.2 по показателю y_1

	y_1	x_2	x_3	x_5
y_1	1	-0,7071	-0,7081	0,6541
x_2	-0,7071	1	1	-0,9743
x_3	-0,7081	1	1	-0,9746
x_5	0,6541	-0,9743	-0,9746	1

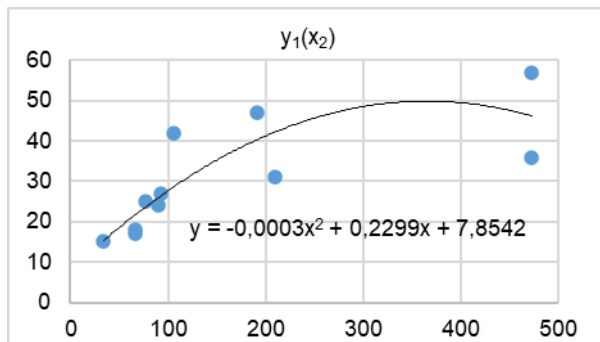


Рис. 1 – Функциональная зависимость $y_1(x_2)$ для подгруппы 1

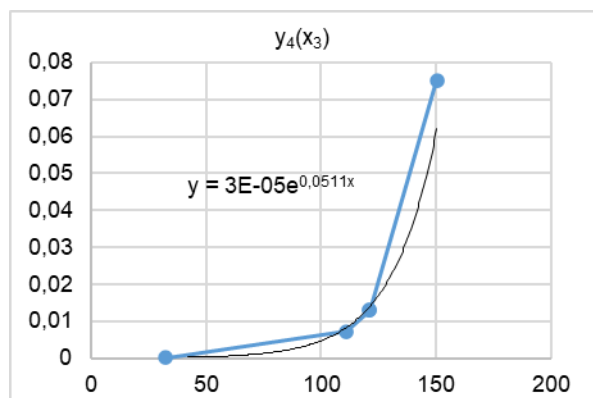


Рис. 2 – Функциональная зависимость $y_4(x_3)$ для подгруппы 2

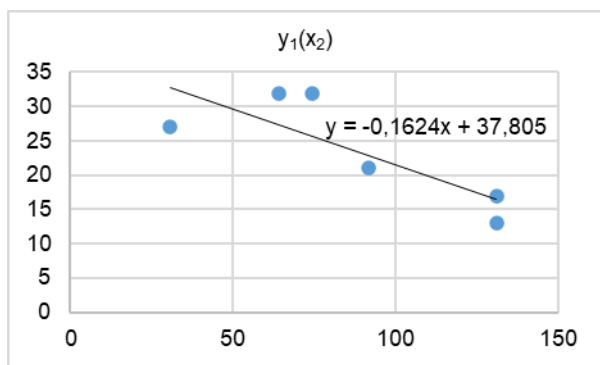


Рис. 3 – Функциональная зависимость $y_1(x_2)$ для подгруппы 3.1

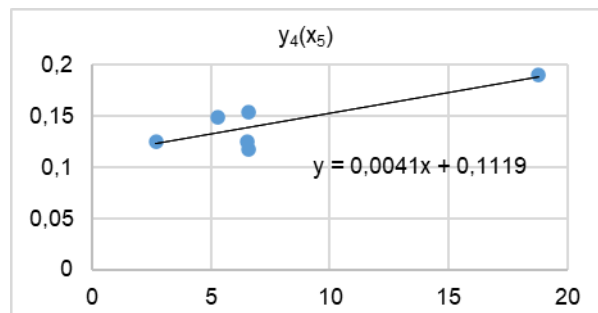


Рис. 4 – Функциональная зависимость $y_4(x_5)$ для подгруппы 3.2

Приведенные в таблицах 2–6 и на рисунках 1–4 данные свидетельствуют о необходимости подтверждения гипотезы, что все параметры от x_1 до x_5 относятся к определяющим.

Анализ исходных данных на основе метода главных компонент

Анализ вкладов (потенциалов) классификационных характеристик судов, кораблей и ИМТ $x_1 \dots x_5$ в изменение показателей систем ТОС $y_1 \dots y_5$ выполнен с помощью МГК, изложенного в методике [11].

Согласно МГК на основе первоначальных базовых матриц парных коэффициентов корреляции, методом итераций определяются значения весовых коэффициентов $\{w_{kj}\}$ на всех шагах итерации k . Процесс определения весовых коэффициентов w_{kj} продолжается до достижения стационарности векторов U_{kj} матрицы корреляции.

Значения независимых переменных $Z_k(w_{kj})$ определяются по формуле

$$Z_k(w_{kj}) = \frac{\sum_{j=1}^m w_{kj} \cdot \bar{x}_j}{\bar{\lambda}_k}, \quad (7)$$

где $\bar{\lambda}_k$ – собственное значение матрицы корреляции, и позволяют оценить «вес» (вклад) $\{w_{kj}\}$ каждого из анализируемых параметров x_j .

На каждом шаге итерации k определяется дисперсия $D(Z_k)$ по формуле

$$D(Z_k) = \frac{\sum_{j=1}^p Z_k(w_{kj})^2}{p}, \quad (8)$$

где p – число переменных (x_j и y_j), взятых в расчет.

Расчеты независимых переменных $Z_k(w_{kj})$ выполняются до получения суммарной дисперсии на всех шагах $\sum D(Z_k) = 1$ (100 %).

После чего определяются потенциалы переменных Π_{Dj} по значению дисперсии $D(Z_k)$ по формуле

$$\Pi_{Dj} = \sum_{k=1}^K Z_k(w_{kj}) \cdot D(Z_k), \quad (9)$$

где K – количество шагов итераций.

Результаты анализа вкладов (потенциалов) классификационных характеристик судов, кораблей и ИМТ в параметры систем ТОС на основе МГК приведены в таблицах 7–11 и на рисунках 5–9.

Таблица 7

Расчетные значения вкладов и потенциалов для подгруппы 1 по показателю y_1

Параметры	Независимые переменные			Потенциалы Π_{Dj}
	$Z_1(w_{1j})$	$Z_2(w_{2j})$	$Z_3(w_{3j})$	
y_1	0,8640	0,3744	-0,1518	0,5329
x_1	0,7596	-0,4192	-0,1258	0,3323
x_2	0,7508	0,0895	-0,4414	0,3660
x_3	0,6701	-0,6256	0,1265	0,2874
x_4	0,6428	0,6172	0,4740	0,5607
x_5	0,8104	0,0805	0,6226	0,5830
Дисперсия $D(Z_k)$	0,5677	0,1838	0,1737	
Суммарная дисперсия $\Sigma D(Z_k)$	0,9252			

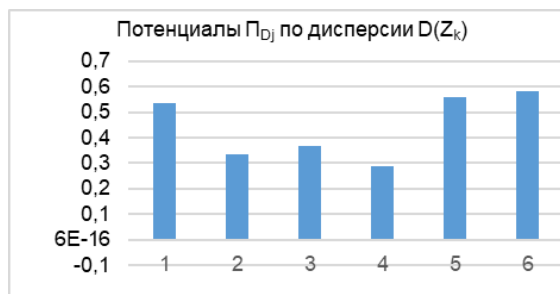


Рис. 5 – График потенциалов Π_{Dj} для подгруппы 1 по показателю y_1

Таблица 8

Расчетные значения вкладов и потенциалов для подгруппы 2 по показателю y_1

Параметры	Независимые переменные			Потенциалы Π_{Dj}
	$Z_1(w_{1j})$	$Z_2(w_{2j})$	$Z_3(w_{3j})$	
y_1	0,7014	-0,4583	0,5235	0,3552
x_1	0,2506	0,9266	0,1948	0,4190
x_2	0,9509	0,0616	0,2356	0,6180
x_3	0,9875	-0,0303	-0,1462	0,5785
Дисперсия $D(Z_k)$	0,6085	0,2672	0,0972	
Суммарная дисперсия $\Sigma D(Z_k)$	0,9729			

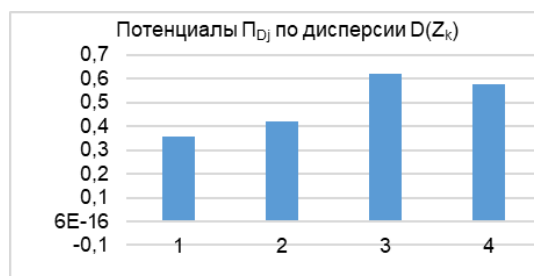


Рис. 6 – График потенциалов Π_{Dj} для подгруппы 2 по показателю y_1

Таблица 9

Расчетные значения вкладов и потенциалов для подгруппы 2 по показателю y_4

Параметры	Независимые переменные			Потенциалы Π_{Dj}
	$Z_1(w_{1j})$	$Z_2(w_{2j})$	$Z_3(w_{3j})$	
y_4	-0,7642	0,6583	-0,1409	-0,4318
x_1	0,2366	0,3855	0,1768	0,2326
x_2	0,9587	0,1904	0,1782	0,7006
x_3	0,9804	0,0282	0,3534	0,6993
Дисперсия $D(Z_k)$	0,6901	0,1562	0,0519	
Суммарная дисперсия $\Sigma D(Z_k)$	0,8983			



Рис. 7 – График потенциалов Π_{Dj} для подгруппы 2 по показателю y_4

Таблица 10

Расчетные значения вкладов и потенциалов для подгруппы 3.1 по показателю y_1

Параметры	Независимые переменные				Потенциалы Π_{Dj}
	$Z_1(w_{1j})$	$Z_2(w_{2j})$	$Z_3(w_{3j})$	$Z_4(w_{4j})$	
y_1	-0,5511	0,7956	-0,1383	0,1583	0,0195
x_2	0,6311	-0,6379	-0,0776	0,4083	0,0659
x_3	0,6549	0,6167	-0,2874	0,2564	0,3974
x_4	0,2665	0,2068	0,9698	0,0281	0,3749
x_5	0,8272	0,2446	-0,1667	-0,4639	0,3069
Дисперсия $D(Z_k)$	0,3774	0,3045	0,2152	0,0947	
Суммарная дисперсия $\Sigma D(Z_k)$	0,9919				

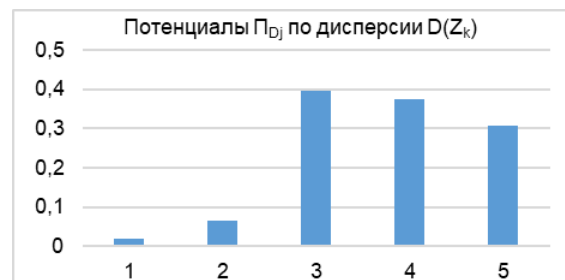
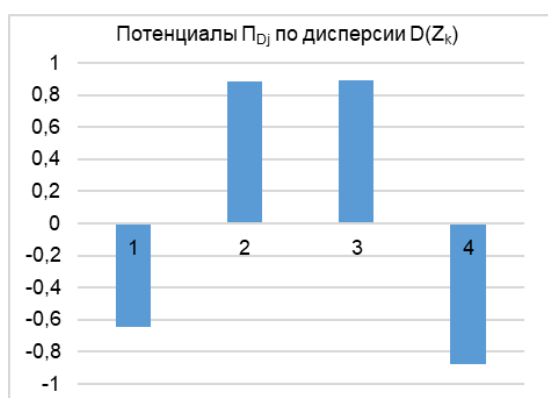


Рис. 8 – График потенциалов Π_{Dj} для подгруппы 3.1 по показателю y_1

Таблица 11

Расчетные значения вкладов и потенциалов для подгруппы 3.2 по показателю y_1

Параметры	Независимые переменные		Потенциалы P_{Dj}
	$Z_1(w_{1j})$	$Z_2(w_{2j})$	
y_1	-0,8021	0,5971	-0,6426
x_2	0,9874	0,1402	0,8871
x_3	0,9877	0,1389	0,8872
x_5	-0,9682	-0,2076	-0,8775
Дисперсия $D(Z_k)$	0,8828	0,1096	
Суммарная дисперсия $\Sigma D(Z_k)$	0,9924		

Рис. 9 – График потенциалов P_{Dj} для подгруппы 3.2 по показателю y_1

Данные результатов анализа потенциалов (вкладов) классификационных характеристик судов $x_1 \dots x_5$ в изменения показателей систем ТОС $y_1 \dots y_5$ определяют множество гипотез моделей оценки показателей и необходимость выбора достоверных. Предложена разработка одно- и многопараметрических линейных и нелинейных моделей оценки показателей систем ТОС y_1, y_2, y_4 в соответствии с методикой [10].

Расчет параметрических моделей оценки показателей систем ТОС

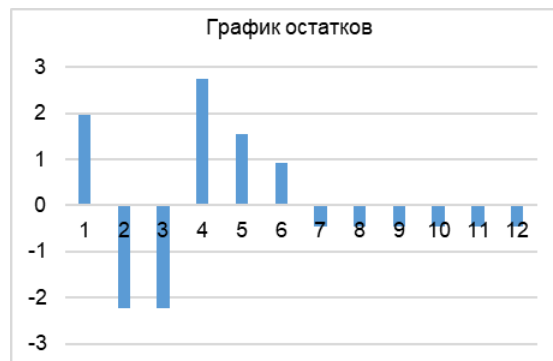
Расчет выполнен на основе метода наименьших квадратов с проверкой статистических критериев несмещенности, эффективности, статистической значимости, оценкой множественного коэффициента корреляции R (корреляционного отношения q_1 для нелинейных моделей), определяющего погрешность оценки при использовании модели согласно методике [10]. С целью снижения установочной методической погрешности оценки показателей реализован подход [12].

В таблице 12 приведены достоверные параметрические зависимости оценки показателей систем ТОС, отвечающие всем статистическим критериям [10]:

- множественный коэффициент корреляции (для линейных и линеаризованных моделей) $0,8 \leq R \leq 1,0$ или корреляционное отношение (для нелинейных моделей) $0,8 \leq q_1 \leq 1,0$;

- выполнено условие статистической значимости $F_p > F_T$ (расчетное значение превышает табличное);
- графики остатков не выявляют отклонения от нормального поведения ошибки (например, рисунок 10).

Для каждой значимой модели построены графики остатков, которые не выявляют отклонений от нормального поведения ошибки, согласно методам [10]. Пример графика остатков приведен на рисунке 10.

Рис. 10 – График остатков для модели $y_2 = 0,4534 + 0,03896 \cdot x_2 - 0,0902 \cdot x_4$ (средний остаток $\bar{e} = -4,1244 \cdot 10^{-7}$)

Разработка временных зависимостей оценки показателей систем ТОС

Временные зависимости оценки показателей систем ТОС ориентированы на достоверный прогноз абсолютных показателей $y_1(t_n)$ и $y_2(t_n)$, где t_n – год создания проекта системы ТОС. Временное прогнозирование в судостроении, предложенное в статье [14], хорошо согласуется с определением абсолютных удельных показателей, отнесенных к значениям определяющих конструктивно-технологических параметров $x_1 \dots x_5$. Поэтому для систем ТОС предложены дополнительно следующие показатели: $y_1^* = y_1/x_j = f(t_n)$ и $y_2^* = y_2/x_j = f(t_n)$ для каждой из конструктивных групп судов, кораблей и ИМТ. Абсолютные удельные временные показатели отражают процесс изменения научно-технических тенденций создания новой техники.

Разработка достоверных временных зависимостей выполнена в соответствии с методикой [10]. Полученные временные зависимости оценки показателей систем ТОС приведены в таблице 13.

Прогноз временных значений показателей y_1, y_2 выполняется усреднением результатов, полученных с использованием достоверных зависимостей, например,

$y_1 = [(y_1/x_1) \cdot x_1 + (y_1/x_2) \cdot x_2 + (y_1/x_3) \cdot x_3 + \dots] / q$, (10)
где q – число использованных уравнений, обеспечивает усреднение результатов.

С целью снижения систематических методических погрешностей, включая установочную, и случайных погрешностей оценок, предлагается усреднение значений показателей систем ТОС, полученных на основе достоверных параметрических зависимостей (таблица 12) и временных (таблица 13), а также снижение установочной погрешности оценки при разработке моделей согласно методике [12].

Таблица 12

Достоверные параметрические модели оценки показателей систем ТОС

Подгруппа судов, кораблей и ИМТ	Вид модели оценки	Множественный коэффициент корреляции R или корреляционное отношение ρ_1
Подгруппа 1	$y_1 = 2,674 + 1,2877 \cdot x_4 + 0,6375 \cdot x_5$	$R = 0,9462$
	$y_1 = -3,837 + 0,45997 \cdot x_2 - 0,00081 \cdot x_2^2$	$\rho_1 = 0,9002$
	$y_4 = 0,0191 - 0,0025 \cdot x_{1\text{кор}} + 0,0055 \cdot x_3$	$R = 0,7944$
	$y_2 = 0,081 - 0,0314 \cdot x_{1\text{кор}} + 0,5291 \cdot x_5$	$R = 0,9016$
Подгруппа 2	$y_1 = 0,7804 - 0,3984 \cdot x_{1\text{кор}} + 0,2808 \cdot x_2$	$R = 0,9234$
	$y_1 = 19,326 + 0,640297 \cdot x_{1\text{кор}} - 1,53548 \cdot x_3$	$R = 0,9895$
	$y_1 = -0,0809 - 0,4109 \cdot x_2 + 3,3268 \cdot x_3$	$R = 0,9194$
	$y_2 = 0,1603 - 0,00999 \cdot x_{1\text{кор}} + 0,02329 \cdot x_2$	$R = 0,9382$
	$y_2 = 0,138 - 0,0036 \cdot x_{1\text{кор}} + 0,1207 \cdot x_3$	$R = 0,9466$
	$y_2 = 0,1508 + 0,0088 \cdot x_2 + 0,0684 \cdot x_3$	$R = 0,9456$
Подгруппа 3.1	$y_1 = 0,0184 - 1,6906 \cdot x_2 + 10,2784 \cdot x_3$	$R = 0,9686$
	$y_1 = 0,2017 + 0,3176 \cdot x_3 + 10,5612 \cdot x_5$	$R = 0,9597$
	$y_4 = 0,0098 + 0,0059 \cdot x_3 - 0,0028 \cdot x_5$	$R = 0,9289$
	$y_2 = 0,4534 + 0,03896 \cdot x_2 - 0,0902 \cdot x_4$	$R = 0,8219$
Подгруппа 3.2	$y_2 = 0,0933 + 0,0111 \cdot x_2 + 1,7327 \cdot x_5$	$R = 0,9173$
	$y_2 = 0,1659 + 0,0565 \cdot x_3 + 1,7119 \cdot x_5$	$R = 0,8993$

Таблица 13

Достоверные временные модели оценки показателей систем ТОС

Подгруппа судов, кораблей и ИМТ	Вид модели оценки	Множественный коэффициент корреляции R или корреляционное отношение ρ_1
Подгруппа 1	$y_1 = 0,1781 + 14,0812 \cdot t_{\text{н}}$	$R = 0,8876$
	$y_2^* = y_1/x_2 = -0,0227 + 0,1477 \cdot t_{\text{н,кор}}$	$R = 0,9993$
	$y_1^* = y_1/x_4 = -0,0003 + 1,5301 \cdot t_{\text{н,кор}}$	$R = 0,9399$
	$y_2 = 0,0014 + 2,1575 \cdot t_{\text{н,кор}}$	$R = 0,8604$
	$y_2^* = y_2/x_2 = -2,8036 \cdot 10^{-7} + 0,0198 \cdot t_{\text{н,кор}}$	$R = 0,8032$
Подгруппа 2	$y_1 = -409,3216 + 213,8678 \cdot t_{\text{н,кор}}$	$R = 0,8031$
	$y_2 = -0,0003 + 1,2877 \cdot t_{\text{н,кор}}$	$R = 0,9665$
	$y_1^* = y_1/x_2 = 0,0004 + 0,1039 \cdot t_{\text{н,кор}}$	$R = 0,8915$
	$y_1^* = y_1/x_3 = 0,0001 + 0,5394 \cdot t_{\text{н,кор}}$	$R = 0,9006$
	$y_2^* = y_2/x_2 = 0,00002 + 0,01483 \cdot t_{\text{н,кор}}$	$R = 0,7921$
	$y_2^* = y_2/x_3 = 0,0001 + 0,0756 \cdot t_{\text{н,кор}}$	$R = 0,8379$
	$y_1 = 0,0012 + 2591,2529 \cdot t_{\text{н,кор}} - 1277,1023 \cdot t_{\text{н,кор}}^2$	$\rho_1 = 0,9680$
	$y_1^* = y_1/x_1 = 0,0005 + 0,5367 \cdot t_{\text{н,кор}}$	$R = 0,8036$
Подгруппа 3.1	$y_1 = -0,0023 + 18,0850 \cdot t_{\text{н,кор}}$	$R = 0,9375$
	$y_1^* = y_1/x_5 = 0,0013 + 7,9878 \cdot t_{\text{н,кор}}$	$R = 0,8898$
Подгруппа 3.2	$y_2 = 0,0153 - 0,0160 \cdot t_{\text{н,кор}} + 1,5343 \cdot t_{\text{н,кор}}^2$	$\rho_1 = 0,9172$

Стохастическое моделирование средних значений числа замечаний по системам ТОС

Показатель u_3 (количество замечаний) носит случайный характер и для прогноза его значения была предложена и реализована процедура имитационного моделирования по методу Монте-Карло, изложенная в статье [15].

Процедура реализована для относительных средних значений оценок $u_5 = u_3/u_1$ для выделенных ранее подгрупп судов, кораблей и ИМТ.

Результаты стохастического моделирования (количество прогонов принято равным 100) средних значений оценки $u_5 = u_3/u_1$ приведены в таблице 14.

Среднее значение показателя $y_5 = y_3/y_1$ для подгруппы 1 составило 0,2221, для подгруппы 2 – 0,0893, для подгруппы 3 – 0,2714.

Результаты имитационного моделирования представлены на рисунках 11–13.

Таблица 14

Результаты стохастического моделирования средних значений оценки $y_5 = y_3/y_1$

Подгруппа 1	Среднее значение $y_5 = y_3/y_1$	Подгруппа 2	Среднее значение $y_5 = y_3/y_1$	Подгруппа 3	Среднее значение $y_5 = y_3/y_1$
Плавдок 1	0,3617	Тральщик 1	0	Танкер 1 (1 этап)	0,1000
Спасательное судно 1	0,2317	Спасательное судно 2	0	Танкер 1 (2 этап)	0,0370
Корабль 2	0,3529	Траулер 1 (1 этап)	0,1235	Танкер 1 (3 этап)	0,4524
Понтон 1	0	Траулер 1 (2 этап)	0,1563	Плавдок 2	0,3810
Ледокол 1	0	Док-понтон 1	0,1667	Пассажирское судно 2	0,0455
Батопорт 1	0,2400			Пассажирское судно 1	0
Корабль 1	0,3571			Ледокол 3	0,5652
Ледокол 2 (1 этап)	0,3889			Паром 1 (1 этап)	0,1538
Ледокол 2 (2 этап)	0,4000			Паром 1 (2 этап)	1,0000
Судно 1	0,1111			Плавкран 1	0,0313
Судно АТО 1	0			Плавкран 2	0,2189
Сумма	2,4435		0,4464		2,9850
Среднее значение	0,2221		0,0893		0,2714

На графиках S_0 – относительное значение среднего числа замечаний по системам ТОС, к которому стремится оценка $y_5 = y_3/y_1$ в результате 100 прогонов стохастического моделирования.

Результаты имитационного моделирования позволяют предварительно оценить качество проектирования систем ТОС, то есть спрогнозировать возможное число замечаний. Для подгруппы 2 ожидаемое относительное среднее число замечаний минимально и составило значение 0,17, для подгруппы 3 – максимально и составило значение 0,42. Полученные значения показывают необходимость разработки мероприятий по сокращению допускаемых ошибок при проектировании систем ТОС, которые приводят к корректировке принятых или разработке новых технических решений, проведению повторной экспертизы на соответствие требованиям пожарной безопасности и в итоге к повышению стоимости и сроков реализации проекта строительства судна в целом.



Рис. 11 – Результат имитационного моделирования среднего числа замечаний по системам ТОС $y_5 = y_3/y_1$ для подгруппы 1: при 100 прогонах $S_0 = 0,25$



Рис. 12 – Результат имитационного моделирования среднего числа замечаний по системам ТОС $y_5 = y_3/y_1$ для подгруппы 2: при 100 прогонах $S_0 = 0,17$



Рис. 13 – Результат имитационного моделирования среднего числа замечаний по системам ТОС $y_5 = y_3/y_1$ для подгруппы 3: при 100 прогонах $S_0 = 0,42$

Заключение

В статье представлена совокупность методических подходов получения оценок показателей систем ТОС в зависимости от классификационных характеристик судов.

Предложен и подтвержден получением достоверных моделей (всего 32, в статье приведена часть) подход в оценке показателей систем ТОС на основе параметрических и временных зависимостей, удовлетворяющих всем статистическим критериям. Данное положение отражает два основных свойства процессов производства материальных объектов в судостроении – пространства и времени.

Предложено применение метода имитационного моделирования средних значений числа замечаний по системам ТОС для оценки качества проектирования, результаты проведения которого показали необходимость разработки и реализации

организационных и технических мероприятий по его повышению.

Полученные результаты анализа систем ТОС и разработанные методические подходы применены в качестве основы дальнейших исследований:

- прогнозирования и планирования создания систем ТОС в рамках реализации «Стратегии развития судостроительной промышленности на период до 2035 года и на дальнейшую перспективу до 2050 года», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 октября 2019 года № 2553-р (в ред. распоряжений Правительства Российской Федерации от 21.10.2024 № 2963-р, от 12.05.2025 № 1181-р), что обеспечивает повышение эффективности судостроительного производства;

- разработки мероприятий по сокращению сроков и стоимости создания систем ТОС и строительства судов в целом, повышения качества проектирования (за счет сокращения количества типовых ошибок) и безопасности проведения работ.

Литература

1. Митус А.А., Ключан А.С. К вопросу о развитии судоремонтной отрасли в процессе модернизации российской экономики // Электронный научный журнал «Вектор экономики». – № 6. – 2021. – С. 1–12. – Текст : электронный. – URL: https://vectoreconomy.ru/images/publications/2021/6/regionaleconomy/Mitus_Klochan.pdf (дата обращения: 28.12.2025).
2. Dr. Tushar N. Desai, Mr. S. R. Prajapati, Mr. Hitesh R. Patel. Application of Value Engineering to Rework Reduction in Ship Building Project // MATEC Web of Conferences. – № 40(3). – 2016. – P. 02008: 1–5. – Текст : электронный. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2016/03/matecconf_icmes2016_02008.pdf (дата обращения: 28.12.2025).
3. Ваучский А.Н. Основные пути снижения стоимости строительства судов. Возможности и перспективы реализации : презентация доклада // Конференция «Ценообразование, трудоемкость и кадровый потенциал в судостроении». – СПб. : АО «ЦТСС», ИА «Медиапалуба». – 21.10.2025. – Текст : электронный. – URL: https://paluba.media/news/203497_public%3A%2F%2FuQm1YTk%2BmPlb%2BGuTHtsJpnblfplK4qUS4apltR3oexP1AVETvQJhfqtnDF3OevdRmR%2F0fePyGwwW%2FWKW0%2FCEA%3D%3D%3A%2F01_Доклад_Ваучского_АН_конференция_21_октяб_ря_2025.ppt&name=01_Доклад_Ваучского_АН_конференция_21_октября_2025.ppt (дата обращения: 28.12.2025).
4. Yujiro Wada, Kunihiro Hamada, Noritaka Hirata. Shipbuilding capacity optimization using shipbuilding demand forecasting model // Journal of Marine Science and Technology. – № 27 (3). – 2021. – P. 522–540.
5. Siying Zhu, Cheng-Hsien Hsieh. Predictive modelling in the shipping industry: analysis from supply and demand sides // Maritime Business Review. – № 10 (3). – 2024. – P. 2–14.
6. Angela Neves, Stein Ove Erikstad, Radu Godina. Enhancing efficiency and sustainability in shipbuilding: insights from lean implementation and challenges // Journal of Marine Science and Technology. – № 30(3). – 2025. – P. 575–616.
7. Пушкаренко И.И., Еремеев В.В., Турищев К.И., Васильев А.В., Заборцев А.В., Сергиенко Е.И., Александров Е.В. Проектные решения по технологическому дооснащению транспортно-передаточного дока проекта 20370 для докового ремонта АПЛ // Судостроение. – № 1. – 2025. – С. 42–48. – ISSN 0039-4580.
8. Габриэлян С.Г., Грабельников В.Ю., Добровенко С.В., Попов С.В. Экспертиза специального раздела технических проектов строительства, ремонта, модернизации кораблей и судов «Требования пожарной безопасности // Пожарная безопасность. – № 2. – 2016. – С. 176–180. – ISSN 2411-3778.
9. Герман Г.В. Методология управления технологией монтажа судового электрооборудования: специальность 2.5.19 (05.08.04) «Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Герман Галина Валентиновна ; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. – СПб, 2001. – 46 с. – Библиогр. : с. 43–44. – Место защиты: Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. – Текст : электронный. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30218308&ysclid=mk5nvuxzel468925822> (дата обращения: 28.12.2025).
10. Герман Г.В., Черненко В.И., Резник Б.Л., Черкас Д.Д. Расчетно-аналитические методы и их использование при решении задач технологической подготовки машиностроительного и судостроительного производств: учебное пособие. – СПб. : Изд-во СПбГМТУ, 2015. – 63 с.
11. Герман Г.В., Никитин Н.В. Методы оценки производственно-технологических работ в судостроении // Морские интеллектуальные технологии. – № 4 (54). – Т. 2. – 2021. – С. 135–139. – ISSN № 2588-0233. – ISSN № 2073-7173.

12. Герман Г.В., Ляховский Е.Е., Резник Б.Л. Снижение установочной погрешности при оценке трудоемкости производственных процессов в судостроении // Морские интеллектуальные технологии. – № 2-1 (60). – 2023. – С. 337–341ю – ISSN: 2073-7173. – ISSN: 2588-0233.
13. Герман Г.В., Потряхаев В.В. Уточнение методологических подходов нормирования трудоемкости работ в судостроении // Вестник ИШ ДВФУ. – № 3 (60). – 2024. – С. 21–37. – ISSN 2227-6858.
14. Ляховский Е.Е., Герман Г.В. Достоверное временное прогнозирование конструктивно-технологических, эксплуатационных и технико-экономических показателей изделий морской техники // Морские интеллектуальные технологии. – № 3 (53). – Т. 1. – 2021. – С. 150–153. – ISSN 2588-0233. – ISSN 2073-7173.
15. Герман Г.В., Федотов В.В., Оленцевич В.С. Прогноз работоспособного состояния технологических схем работ // Естественные и технические науки. – № 7 (109). – 2017. – С. 154–164. – ISSN 1684-2626.

References

1. Mitus A.A., Klochan A.S. On the development of the ship repair industry in the process of modernization of the Russian economy // Electronic scientific journal "Vector of Economics". – No. 6. – 2021. – pp. 1-12. URL: https://vectoreconomy.ru/images/publications/2021/6/regionaleconomy/Mitus_Klochan.pdf.
2. Dr. Tushar N. Desai, Mr. S. R. Prajapati, Mr. Hitesh R. Patel. Application of Value Engineering to Rework Reduction in Ship Building Project // MATEC Web of Conferences. – № 40(3). – 2016. – P. 02008: 1–5. URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2016/03/mateconf_icmes2016_02008.pdf.
3. Vauchsky A.N. The main ways to reduce the cost of ship construction. Opportunities and prospects for implementation : presentation of the report // Conference "Pricing, labor intensity and human resources in shipbuilding". – St. Petersburg : JSC "TSSS", IA "Mediapaluba". – 10/21/2025. URL: <https://paluba.media/news/203497>, https://docs.360.yandex.ru/docs/view?url=ya-disk-public%3A%2F%2FuQm1YTk%2Bmplb%2BGuTHtsJpnbLfplK4qUS4apltR3oexP1AVETvQJhfqnDF3OevdRmR%2F0fePyGwwW%2FWKW0%2FCEA%3D%3D%3A%2F01_Доклад_Ваучского_АН_конференция_21_октяб_ря_2025.ppt&name=01_Доклад_Ваучского_АН_конференция_21_октября_2025.ppt.
4. Yujiro Wada, Kunihiro Hamada, Noritaka Hirata. Shipbuilding capacity optimization using shipbuilding demand forecasting model // Journal of Marine Science and Technology. – № 27 (3). – 2021. – P. 522–540.
5. Siying Zhu, Cheng-Hsien Hsieh. Predictive modelling in the shipping industry: analysis from supply and demand sides // Maritime Business Review. – № 10 (3). – 2024. – P. 2–14.
6. Angela Neves, Stein Ove Erikstad, Radu Godina. Enhancing efficiency and sustainability in shipbuilding: insights from lean implementation and challenges // Journal of Marine Science and Technology. – № 30(3). – 2025. – P. 575–616.
7. Pushkarenko I.I., Ereemeev V.V., Turishchev K.I., Vasiliev A.V., Zabortsev A.V., Sergienko E.I., Alexandrov E.V. Design solutions for technological retrofitting of the transport and transfer dock of project 20370 for the dock repair of submarines. – No. 1. – 2025. – pp. 42-48. – ISSN 0039-4580.
8. Gabrielyan S.G., Grabelnikov V.Yu., Dobrovenko S.V., Popov S.V. Examination of a special section of technical projects for the construction, repair, modernization of ships and vessels "Fire safety requirements // Fire safety. – No. 2. – 2016. – pp. 176-180. – ISSN 2411-3778.
9. German G.V. Methodology of controlling the technology of installation of marine electrical equipment: specialty 2.5.19 (08/05/04) "Technology of shipbuilding, ship repair and organization of shipbuilding production" : abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / German Galina Valentinovna ; St. Petersburg State Maritime Technical University. – St. Petersburg, 2001. – 46 p. – Bibliogr. : pp. 43-44. – Place of protection: St. Petersburg State Maritime Technical University. – Text : electronic. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30218308&ysclid=mk5nvuxzel468925822> (date of reference: 12/28/2025).
10. German G.V., Chernenko V.I., Reznik B.L., Cherkas D.D. Computational and analytical methods and their use in solving problems of technological training of machine-building and shipbuilding industries: a textbook. St. Petersburg : Publishing House of St. Petersburg State Technical University, 2015. 63 p.
11. German G.V., Nikitin N.V. Methods of evaluation of production and technological work in shipbuilding // Marine intelligent technologies. – No. 4 (54). – Vol. 2. – 2021. – pp. 135-139. – ISSN No. 2588-0233. – ISSN No. 2073-7173.
12. German G.V., Lyakhovsky E.E., Reznik B.L. Reduction of the installation error in assessing the complexity of production processes in shipbuilding // Marine intelligent technologies. – № 2-1 (60). – 2023. – Pp. 337-341. - ISSN: 2073-7173. – ISSN: 2588-0233.
13. German G.V., Shtrakhaev V.V. Clarification of methodological approaches to rationing the complexity of work in shipbuilding // Bulletin of the FEFU School of Economics. – № 3 (60). – 2024. – Pp. 21-37. – ISSN 2227-6858.
14. Lyakhovsky E.E., German G.V. Reliable time forecasting of structural, technological, operational, technical and economic indicators of marine equipment products // Marine intelligent technologies. – No. 3 (53). – Vol. 1. – 2021. – pp. 150-153. – ISSN 2588-0233. – ISSN 2073-7173.
15. German G.V., Fedotov V.V., Olentsevich V.S. Forecast of the operational state of technological schemes of work // Natural and technical sciences. – № 7 (109). – 2017. – Pp. 154-164. – ISSN 1684-2626.

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

Герман Галина Валентиновна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии судостроения Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, 190121, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3, e-mail: germangalina@yandex.ru

Galina V. German, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Marine Technology of the St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: germangalina@yandex.ru

Попов Сергей Валентинович, кандидат технических наук, главный инженер АО «НИПТБ «Онега», 164509, Архангельская обл., г. Северодвинск, Машиностроителей проезд, д. 12, e-mail: svpopoff@mail.ru

Sergey V. Popov, Candidate of Technical Sciences, Chief Engineer, AO NIPTB Onega, 12 Mashinostroiteley proezd, Severodvinsk, Arkhangelsk Region, 164509, e-mail: svpopoff@mail.ru

Иванова Виктория Алексеевна, инженер-конструктор АО «НИПТБ «Онега», 164509, Архангельская обл., г. Северодвинск, Машиностроителей проезд, д. 12, e-mail: avdyunina@list.ru

Victoria A. Ivanova, Design Engineer, AO NIPTB Onega, 12 Mashinostroiteley proezd, Severodvinsk, Arkhangelsk Region, 164509, e-mail: avdyunina@list.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 07.02.2026.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 12.02.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 20.02.2026.

Научная статья

УДК 621.7.024

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.007>

Особенности развития гидроудара в двухфазном потоке

Лебедева Е.Г.¹ eg.lebedeva@narfu.ru, Медведева Е.С.¹ medvedeva.e.s@edu.narfu.ru¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Аннотация. При вводе сжатого воздуха в жидкостной поток для двухфазной промывки трубопроводных систем и их элементов может наблюдаться явление гидроудара – опасного явления разрушающего стенки трубопроводных элементов, вызывающего шум, вибрацию и приводящие к нарушению структуры потока. Изучение гидроудара в двухфазном потоке позволяет предусмотреть мероприятия по снижению негативных последствий. Течение двухфазного потока в трубопроводе при резком его перекрытии приводит к росту ударного давления, в следствии которого может произойти нарушение целостности трубопровода. Развитие гидроудара в двухфазном потоке зависит от содержания в потоке воздуха. При промывке судовых систем пульсирующим двухфазным потоком, воздухосодержание определяется в зависимости от условий обеспечения бескавитационных условий работы и лежит в рабочем диапазоне до 25%. При этих значениях объемного воздухосодержания актуальным является определение особенностей поведения двухфазной среды и возможного развития гидроудара в производственных условиях. Авторами выявлено, что на развитие гидроудара в двухфазном потоке влияют исходное давление в потоке, внутренний диаметр трубы, толщина стенки трубы и объемное воздухосодержание. Установлено, что развитие гидроудара становится практически невозможным при объемном содержании воздуха более 50% за счет сжимаемости газовых фракций в смеси. Негативное влияние при гидроударе на целостность трубопровода при меньших содержаниях воздуха в районе от 0 до 5% возможно. При значениях объемного содержания воздуха более 5% эквивалентные напряжения в трубе значительно меньше допустимых.

Ключевые слова: Воздухосодержание, гидроудар, двухфазный поток, эквивалентные напряжения, промывка судовой системы.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 25-29-20053.

Для цитирования: Лебедева Е.Г., Медведева Е.С. Особенности развития гидроудара в двухфазном потоке, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 79—85. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.007.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.007>

Features of the development of a water hammer in a two-phase flow

Elena G. Lebedeva¹ eg.lebedeva@narfu.ru, Elizaveta S. Medvedeva¹ medvedeva.e.s@edu.narfu.ru¹The Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

Abstract. When compressed air is introduced into a liquid stream for two-phase flushing of pipeline systems and their elements, the phenomenon of water hammer can be observed - a dangerous phenomenon that destroys the walls of pipeline elements, causing noise, vibration and leading to disruption of the flow structure. The study of a water hammer in a two-phase flow makes it possible to provide measures to reduce negative consequences. The flow of a two-phase flow in the pipeline, when it is abruptly blocked, leads to an increase in impact pressure, which may result in a violation of the integrity of the pipeline. The development of a water hammer in a two-phase flow depends on the air content in the flow. When flushing ship systems with a pulsating two-phase flow, the air content is determined depending on the conditions for ensuring cavitation-free working conditions and lies in the operating range up to 25%. With these values of volumetric air content, it is important to determine the behavior of a two-phase medium and the possible development of a water hammer in industrial conditions. The authors revealed that the development of a water hammer in a two-phase flow is influenced by the initial pressure in the flow, the inner diameter of the pipe, the wall thickness of the pipe and the volume air content. It is established that the development of a water hammer becomes almost impossible with a volume air content of more than 50% due to the compressibility of the gas fractions in the mixture. A negative impact of a water hammer on the integrity of the pipeline with lower air contents in the range from 0 to 5% is possible. If the air volume content is more than 5%, the equivalent stresses in the pipe are significantly lower than the permissible ones.

Keywords: Air content, water hammer, two-phase flow, equivalent voltages, flushing of the ship's system.

Financing: The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation within the framework of scientific project No. 25-29-20053.

For citation: Elena G. Lebedeva, Elizaveta S. Medvedeva. Features of the development of hydraulic impact in a two-phase flow, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 79—85. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.007.

Введение

Гидравлический удар представляет собой вид неустановившегося течения жидкости в трубопроводе, который характеризуется колебаниями давлений, в следствие чего происходят резкие изменения скорости потока в момент столкновения его с препятствием. Возникновение и развитие гидроудара может привести к серьезным последствиям, таким как, повреждения трубопроводных элементов, нарушение герметичности соединения и т.д. Причиной гидроудара может стать внезапное закрытие или открытие арматуры, быстрый пуск или остановка работы гидродвигателя или насоса, наличие значительных перепадов площади сечения, имеющие изгибы труб в виде колен и отводов, присутствие воздушных пустот и другие причины. При гидравлическом ударе происходит преобразование одного вида энергии в другой: кинетическая энергия движущегося потока жидкости преобразуется в энергию упругой деформации жидкости и деформации стенок трубопровода. В жидкости происходит образование ударной волны с. Процесс развития гидроудара является волновым, цикл повторяется, энергия упругой деформации превращается в кинетическую и наоборот. В идеальной жидкости колебания могут длиться вечно, но в реальной жидкости процесс имеет затухающий характер в результате рассеивания механической энергии. Наиболее опасным является гидроудар, возникающий при резком полном перекрытии сечения канала в протяженном трубопроводе, когда одновременно сочетаются максимально возможные давления с полной остановкой потока с первичной ударной волной.

Основная часть

При промывке протяженных судовых систем пульсирующим двухфазным потоком могут наблюдаться негативные волновые процессы, связанные с гидроударом, перед прохождением двухфазной смеси перемычек и резких поворотов в виде отводов.

Установка технологических перемычек при промывке необходима. Перемычки используются для исключения участков системы с оборудованием и устройствами. Диаметры данных перемычек могут быть меньше диаметра основного трубопровода почти в 2 раза в зависимости от условий производства.

В реальности, поток встречая на своем пути резкое изменение сечения канала вынужден перестраивать эпюру скорости и претерпевает при этом не прямой и неполный удар, при котором скорость падает не до нуля и значения давления при этом не достигают максимальных значений. Картина развития гидроудара не явная по сравнению с полным и прямым гидроударом.

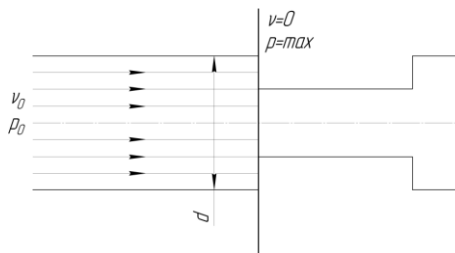


Рис. 1. Упрощенная модель исследования

Для выявления опасного состояния при гидроударе в двухфазном потоке поставим условия: поток смеси останавливается полностью при максимальном росте давления в нем. Для изучения влияния и последствия возникновения полного и прямого гидроудара в двухфазном потоке представим в качестве модели смешанный двухфазный поток, движущийся в трубе постоянного сечения с установленной технологической перемычкой, полностью перекрываемый в месте установки перемычки. В таком случае гидроудар развивается по самому опасному сценарию с точки зрения работы системы в целом.

В случае полной остановки сжимаемого двухфазного потока перед препятствием величина увеличения давления в результате прямого и полного гидравлического удара определяется по формуле Н.Е. Жуковского [1]:

$$\Delta p = \rho_{см} \cdot c \cdot v_{см0} \quad (1)$$

где Δp - величина повышения давления, МПа;

$\rho_{см}$ - плотность двухфазной смеси, кг/м³;

c - скорость распространения звука в двухфазной смеси, м/с;

$v_{см0}$ - начальная скорость потока, м/с.

Среднюю скорость двухфазной смеси можно определить из уравнения неразрывности:

$$v_{см0} = \frac{4 \cdot Q_{см0}}{\pi \cdot d^2} \quad (2)$$

где $Q_{см0}$ - объемный расход смеси, м³/с; d - внутренний диаметр трубы, м.

Плотность двухфазной смеси определяется через объемное газосодержание φ по формуле [2]:

$$\rho_{см} = \rho' \cdot (1 - \varphi) + \rho'' \cdot \varphi \quad (3)$$

где φ - объемное воздуходоудержание,

ρ' - плотность жидкости, кг/м³;

ρ'' - плотность газа, кг/м³.

Объемное воздуходоудержание φ устанавливается через объемные расходы воды Q' и воздуха Q'' , по формуле:

$$\varphi = \frac{Q''}{Q_{см}} = \frac{Q''}{Q' + Q''}$$

Скорость распространения звука в однофазной среде значительно больше скорости распространения звука в двухфазной смеси воды и воздуха. Скорость звука в двухфазной смеси зависит от исходного давления в потоке перед препятствием, плотности жидкости, фазового состава и объемного воздуходоудержания [3]:

$$c = \sqrt{\frac{p_0}{\rho' \cdot \varphi(1-\varphi)}}, \text{ м/с.} \quad (3)$$

где p_0 - давление внутри жидкости (воды) в Па в потоке смеси до гидроудара.

Из формулы (1) следует, что величина повышения давления при гидроударе прямо пропорциональна плотности смеси, скорости звука в среде и скорости движения потока до развития удара.

Существуют различные режимы течения двухфазных потоков. Считаем, что объемное содержание воздуха φ в смеси таково, что можно принять равномерное распределение пузырьков воздуха по объему смеси (пузырьковый или эмульсионные режимы течения двухфазного потока).

Для режима с небольшим содержанием φ примем удобную для изучения гомогенную модель движения двухфазного потока, в которой смесь жидкости и газа рассматривается как однородная среда с одинаковыми скоростями движения фаз без скольжения относительно друг друга. Для гомогенной модели течения двухфазного потока характерно движение газа в виде отдельных, очень малых по сравнению с радиусом трубы, пузырьков, количество которых равномерно распределено по сечению трубы. Считаем, что гомогенная газожидкостная среда обладает равномерно распределенной по сечению плотностью $\rho_{см}$, и сжимаемостью, обусловленной сжатием воздушной фазы в потоке при повышении давления. То есть, сжимаемость газожидкостной смеси происходит за счет сжатия воздуха в потоке при росте давления в смеси в результате гидроудара. В результате высокой степени сжимаемости среды является низкое значение скорости звука, что уменьшает величину гидравлического удара и компенсирует рост давления:

$$\Delta p = (\rho' \cdot (1 - \varphi) + \rho'' \cdot \varphi) \cdot \sqrt{\frac{p_0}{\rho' \cdot \varphi(1 - \varphi)}} \cdot \frac{1}{\pi \cdot d^2} \cdot 4 \cdot Q_{см0}$$

Степень сжатия потока при возникновении гидроудара в соответствии с законом изотермического сжатия можно определить в соответствии с законом Бойля-Мариотта для секундного объема движущейся двухфазной среды [4]:

$$p_0 Q_{см0} t = p_1 Q_{см1} t,$$

где $Q_{см0}$ и $Q_{см1}$ расходы (секундные объемы) двухфазного потока до и при гидроударе в м³/с; p_0 и p_1 – давления до и при гидроударе в трубе. За t примем равный промежуток времени.

Повышенное давление в трубе при гидроударе можно определить как:

$$p_1 = p_0 + \Delta p$$

Расход двухфазной смеси $Q_{см1}$ в процессе гидроудара меняется за счет изотермического сжатия. Его можно определить с учетом фазового состава смеси:

$$Q_{см1} = \frac{p_0 Q_{см0}}{p_1} = \frac{p_0 Q_{см0}}{p_0 + \Delta p}$$

Или с учетом фазового состава двухфазной смеси:

$$Q_{см1} = \frac{Q_{см0} p_0}{p_0 + (\rho' \cdot (1 - \varphi) + \rho'' \cdot \varphi) \cdot \sqrt{\frac{p_0}{\rho' \cdot \varphi(1 - \varphi)}} \cdot \frac{1}{\pi \cdot d^2} \cdot 4 \cdot Q_{см0}}$$

Таким образом, полученное выражение характеризует сжатие двухфазного потока для секундного объема $Q_{см1}$, полученное в ходе развития

гидроудара в трубе постоянного сечения d , где сжатие происходит за счет повышения давления при ударе потока о препятствие на величину Δp .

Примем за разницу в расходах $\Delta Q = Q_{см0} - Q_{см1}$ величину изменения секундного объема за счет изотермического сжатия в двухфазной смеси при гидроударе. Относительное значение объемного сжатия обозначим как отношение объемного сжатия к первоначальному расходу до гидроудара $\frac{\Delta Q}{Q_{см0}}$.

Первоначальный расход смеси до гидроудара обозначим через сумму расходов жидкостной и воздушной фаз:

$$Q_{см0} = Q'' + Q',$$

где Q'' – расход воздушной фазы в смешанном потоке в м³/с, который можно определить от воздухоносодержания: $Q'' = \varphi Q_{см0}$;

Q' – расход жидкостной фазы в потоке в м³/с.

Или можно записать с учетом объемного воздухоносодержания:

$$Q_{см0} = \frac{1}{1 - \varphi} Q',$$

Величина относительного объемного сжатия представлена на рисунке 2 при расходе воды $Q' = 0,071$ м³/час, температуре 40°C в трубе диаметром DN100

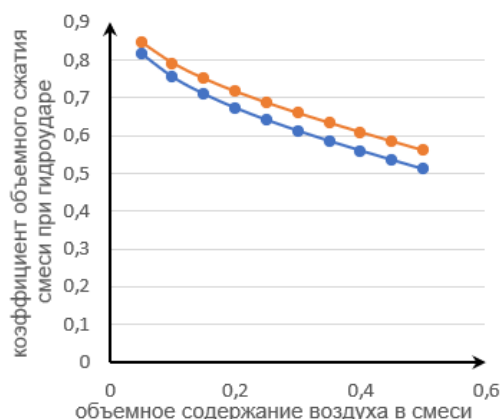


Рис. 2. Коэффициент объемного сжатия $\frac{\Delta Q}{Q_{см0}}$ в зависимости от объемного воздухоносодержания φ для давления $p_0 = 200$ кПа и $p_0 = 300$ кПа. Верхний график соответствует давлению 200 кПа в потоке смеси, нижний – 300 кПа при расходе $Q' = 0,071$ м³/час.

Как видно из графика с увеличением содержания воздуха в потоке уменьшается коэффициент объемного сжатия $\frac{\Delta Q}{Q_{см0}}$. При уменьшении давления Δp в смеси по мере роста объемного содержания воздуха происходит компенсация давления за счет объемного сжатия и содержащегося воздуха в смеси. Это происходит при достижении определенных значений воздухоносодержания φ , скорости потока $v_{см0}$ и значения начального давления p_0 . Таким образом, интерес представляет определение значений воздухоносодержания, при которых будет происходить компенсация сжатия смеси в потоке за счет воздуха. То есть, при некоторых значениях перечисленных величин степень объемного сжатия будет являться достаточной, чтобы растяжение труб при гидроударе не происходило. С точки зрения реальных расходов, это ориентировочно будет достигаться при значении объемного расхода воздуха в смешанном потоке Q''

$> \Delta Q$. На рисунке 3 представлено сравнение расхода воздушной фазы в двухфазном потоке и

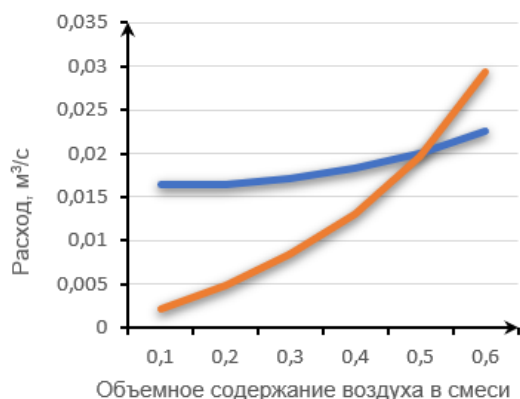


Рис. 3. Графики зависимости ΔQ (синий), расход воздуха Q'' (оранжевый) (расходы в м³/с) в зависимости от ϕ .

значение объемного сжатия при гидроударе при повышении давления на величину Δp . На рисунке 3 синим цветом выделен график ΔQ , оранжевым - Q'' для давления в потоке перед гидроударом 300кПа.

Как видно из графиков объемное сжатие потока при гидроударе полностью компенсируется при большом содержании воздуха, $\phi > 0,5$. При меньших значениях ϕ растяжение труб под действием повышенного давления будет возможным.

При промывке систем двухфазным пульсирующим потоком определено, что объемное воздуходождение должно достигать значений до 0,25 [5]. Следовательно, развитие гидроудара может оказать негативное влияние на целостность трубопроводных элементов.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние трубопроводного элемента после явления гидроудара с ростом давления на величину Δp .

Проверочный расчет прочности для трубопроводов можно выполнять двумя методами [6]: по допускаемым напряжениям и по предельным состояниям. Согласно первому методу, необходимо, чтобы наибольшее напряжение в элементе $\sigma_{\max}$ не превышало допускаемого напряжения для данного материала $[\sigma]$:

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma]$$

Допускаемые напряжения составляют некоторую долю от предельных значений. Запас прочности n показывает, во сколько раз допускаемое напряжение меньше предельного напряжения, которое может быть равно либо пределу текучести σ_t , либо пределу прочности σ_b :

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{пр}}}{n}$$

Введение коэффициента запаса обуславливается разбросом величин σ_t , σ_b , не совершенностью методов расчета, невозможностью точно установить действующие расчетные нагрузки и т.д. Этот метод до сих пор широко применяется в машиностроении.

Напряженно-деформированное состояние участка трубопровода включает в себя составляющие, зависящие от внутреннего рабочего давления, от температуры проводимой среды и напряжения, обусловленные внешними силами.

Расчётная модель выглядит следующим образом [7]: короткая труба находится между двумя жёстко закреплёнными элементами системы и установлена на штатное место без монтажных напряжений. При промывке участок трубы нагружен максимально возможным давлением $p_0 + \Delta p$, возникающим вследствие гидроудара, с температурой, равной температуре смеси при технологической промывке, то есть $t = 40^\circ \text{C}$. При расчете такой модели принимаются следующие условия:

- прочность сварных швов, если они имеются, равна прочности основного материала;
- толщина стенок трубы не изменяется, то есть не подвергается коррозионному воздействию;
- отклонения от круглой формы труб не учитываются.

Трубопровод испытывает продольные (осевые) σ_m , кольцевые (касательные) σ_t и радиальные напряжения σ_r . Схема напряжений представлена на рисунке 4.

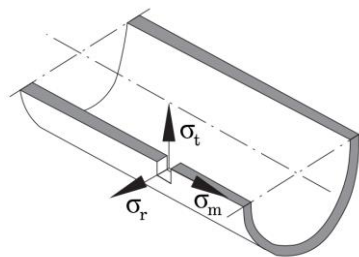


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние участка круглой трубы.

Радиальные напряжения σ_r обусловлены максимальным избыточным давлением $p_1 = p_0 + \Delta p$, которое находится как разница между внутренним давлением $p_{\text{абс}}$ и внешним $p_{\text{атм}}$ ($p_{\text{атм}}$ представляет собой атмосферное равное 10^5 Па). Радиальные напряжения равны по значению максимальному избыточному давлению и противоположны по направлению:

$$\sigma_r = -p_1$$

где $p_1 = p_0 + \Delta p$ определено относительно исходного p_0 и ударного повышения давления Δp .

В таблице 1 приведен расчет для внутреннего давления в потоке при начальном давлении $p_0 = 300 \text{ кПа}$ для различного воздуходождения. Исходными данными для расчета являются: расход воды $Q' = 70,65 \text{ м}^3/\text{ч}$, внутренний диаметр трубы DN100, плотность воды $\rho' = 992 \text{ кг/м}^3$ и начальная плотность воздуха при давлении 300кПа $\rho'' = 3,34 \text{ кг/м}^3$ в диапазоне объемного воздуходождения от 0,1% до 50% в смешанном двухфазном потоке.

Кольцевые напряжения σ_t также зависят от максимального избыточного давления p_1 и определяются из условия равновесия части трубы, отсеченной поперечной плоскостью:

$$\sigma_t = \frac{p_1 \cdot d_{\text{вн}}}{2 \cdot \delta}$$

где $d_{\text{вн}}$ - внутренний диаметр трубы, м;
 δ - толщина стенки, м.

Продольные напряжения σ_m складываются из нескольких составляющих:

- напряжения от избыточного давления p_1 . В этом случае для определения продольных

напряжений рассматривают условие равновесия элемента трубы от сил, направленных вдоль его оси:

$$\sigma_{m1} = \mu \cdot \frac{p_1 \cdot d_{вн}}{2 \cdot \delta}$$

где μ - коэффициент Пуассона.

— термическими напряжениями и напряжения изгиба можно пренебречь в случае постоянства температуры.

Таким образом, продольные напряжения можно вычислить как:

$$\sigma_m = \sigma_{m1} = \mu \cdot \frac{p \cdot d_{вн}}{2 \cdot \delta}$$

Эквивалентное (расчетное) напряжение вычисляется по IV энергетической теории прочности

в общем виде с учетом действия всех напряжений σ_m , σ_t и σ_r и последующего сравнения с допускаемым значением напряжения $[\sigma]$ для данного материала трубопровода:

$$\sigma_{экр} = \sqrt{\frac{(\sigma_m - \sigma_r)^2 + (\sigma_m - \sigma_t)^2 + (\sigma_r - \sigma_t)^2}{2}} \leq [\sigma]$$

С учетом вышеизложенного при отсутствии изменения температуры, то есть при $\sigma_t=0$:

$$\sigma_{экр} = \sqrt{\frac{(\sigma_{m1} - \sigma_r)^2 + (\sigma_{m1})^2 + (\sigma_r)^2}{2}} \leq [\sigma]$$

Таблица 1.

Величина внутреннего давления в двухфазном потоке при гидроударе.

φ	0,001	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
p_0 , МПа	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
$v_{см0}$, м/с	2,50	2,63	2,78	2,94	3,13	3,33	3,57	3,84	4,16	4,54	5,00
c , м/с	3923	541	372	295	248	215	190	170	153	138	125
$\rho_{см}$, кг/м ³	991	942	893	843	794	744	695	646	596	547	497
Δp , МПа	9,73	1,34	0,93	0,73	0,62	0,53	0,47	0,42	0,38	0,34	0,31
p_1 , МПа	10,03	1,64	1,23	1,03	0,92	0,84	0,77	0,72	0,68	0,64	0,61

Изготовление ответственных трубопроводов судовых систем производится из углеродистой стали. Примем, что материал трубопровода сталь 10, способ изготовления трубы - бесшовная горячедеформированная, имеет следующие размеры: наружный диаметр $D_{нар} = 108$ мм, толщина стенки $\delta = 4$ мм [8]. Для получения сравнительной характеристики (внутренний диаметр трубы составит 100 мм) выполним расчеты эквивалентного напряжения для давлений внутри трубы $p_1 = 300$ кПа и 200 кПа.

В соответствии со справочными данными [9] значения величин для стали 10 при $t = 40$ °C составляют:

- допускаемое напряжение $[\sigma] = 129$ МПа;
- модуль упругости $E = 1,97 \cdot 10^5$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\mu = 0,28$.

Расчет проведен в программе Microsoft Excel. Результаты расчетов отображены на рисунке 5 в виде графиков. Синий график - для исходного давления в трубе $p_1 = 300$ кПа, оранжевый график - для исходного давления в трубе $p_1 = 200$ кПа.

Анализ графиков показал, что величина эквивалентных напряжений $\sigma_{экр}$ достигает значений соизмеримых с допускаемыми при очень малом содержании воздуха в потоке φ или вообще при отсутствии воздуха в потоке.

Резкое снижение расчетного напряжения $\sigma_{экр}$ наблюдается при малых газосодержаниях φ (до 5 %), дальнейшее его падение оказывается незначительным. Стоит отметить, что с повышением исходного давления в смеси p_1 при одинаковых газосодержаниях φ наблюдается увеличение расчетных напряжений $\sigma_{экр}$. Увеличение избыточного давления p_1 приводит к росту расчетного напряжения металла при гидроударе.

Исследуя полученные зависимости, приходим к выводу, что увеличение внутреннего диаметра $d_{вн}$ (при неизменной толщине стенки δ) приводит к росту эквивалентных напряжений.

Так как значение воздухоудержания оптимальное для промывки судовых систем находится в районе 20%, то можно сделать вывод, что эквивалентные напряжения $\sigma_{экр}$ в трубе DN100 при толщине стенки 4мм составят при давлении $p_1=300$ кПа 9,74МПа, а при $p_1=200$ кПа 7,19МПа, что значительно меньше допускаемого $[\sigma] = 129$ МПа.

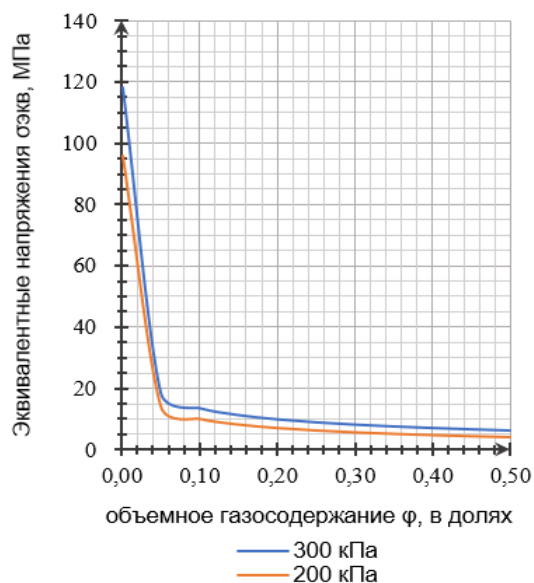


Рис. 5. Зависимость эквивалентных напряжений $\sigma_{экр}$ от воздухоудержания φ

Заключение

Выбор оптимальных условий промывки двухфазной смесью является комплексной задачей, одновременно учитывающей несколько факторов. Режимы промывки зависят от скорости промывочного потока, объемного воздухоудержания, давления в потоке. Влияние на процесс промывки негативного явления, такого как гидроудар, также связана с величиной скорости звука в потоке, которая в свою очередь зависит от количества воздуха в смеси и давления в ней, и может привести к расслоению потока, нарушению целостности трубопровода.

Выявлено, что при рекомендуемых значениях объемного воздухоудержания в смешанном

двухфазном потоке развитие гидроудара не оказывает серьезных последствий на целостность трубопровода в виду сжатия в потоке смеси газовой фракции, которая оказывает демпфирующую роль и одновременного выполнения при этом условий прочности $\sigma_{\text{экв}} \leq [\sigma]$. Поскольку в статье рассмотрен самый опасный с точки зрения роста ударного давления случай, соответствующий прямому и полному гидроудару с полным и резким перекрытием канала, можно сделать вывод, что при содержании воздуха в промывочной смеси около 20 % негативные последствия гидроудара не затронут целостность трубопровода. Влияние на структуру двухфазного потока при гидроударе может быть рассмотрено дополнительно при проведении эксперимента.

Литература

1. Жуковский, Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах, Москва, Ленинград: Гостехиздат, 1949. - 103 с.
2. Накоряков, В.Е. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред / В.Е. Накоряков, Б.Г. Покусаев, И.Р. Шрейбер. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. - 246 с.
3. Вилка Чаича М.Б., Юнусова С., Шикин Г.Н. О скорости звука в двухфазной и двухкомпонентной среде, Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Математика, информатика, физика. 2011. № 2. С. 161-164.
4. Теплотехника: учебник для вузов под ред. А. П. Баскакова. - Москва: Энергоиздат, 1982. - 264 с.
5. Лебедева Е.Г., Ершова И.В., Кулякин Р.Е. Определение максимального количества вводимого воздуха по условиям бескавитационного течения в трубопроводных элементах, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 3-1 (69). С. 90-95.
6. Зезин, В.Г. Гидравлический удар. Расчет гидродинамических параметров: учебное пособие / В.Г. Зезин. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2021. – 50 с.
7. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность [Текст]. - Введ. 1990-01-01. - Москва: ИПК Издательство стандартов, 2008. - 55 с.
8. ГОСТ 8732-78. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные [Текст]. - Введ. 1979-01-01. - Москва: ИПК Издательство стандартов, 1998. - 11 с.
9. Писаренко, Г.С. Справочник по сопротивлению материалов, Киев, Наукова думка, 1988г. - 736стр.

References

1. Zhukovsky, N. E. On hydraulic shock in water pipes, Moscow, Leningrad: Gostekhizdat, 1949. 103 p.
2. Nakoryakov, V.E. Wave dynamics of gas and vapor-liquid media / V.E. Nakoryakov, B.G. Pokusaev, I.R. Schreiber. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 246 p
3. Vilka Chaicha M.B., Yunusova S., Shikin G.N. On the speed of sound in a two-phase and two-component medium, Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Mathematics, Computer Science, Physics. 2011. No. 2. pp. 161-164.
4. Heat engineering: textbook for universities, edited by A. P. Baskakov. Moscow: Energoizdat Publ., 1982. 264 p.
5. Lebedeva E.G., Yershova I.V., Kulyakin R.E. Determination of the maximum amount of injected air according to cavitation-free flow conditions in pipeline elements, Marine intelligent technologies. 2025. No. 3-1 (69). pp. 90-95.
6. Zezin, V.G. Hydraulic shock. Calculation of hydrodynamic parameters: a textbook / V.G. Zezin. Chelyabinsk : SUSU Publishing Center, 2021. 50 p.
7. GOST 14249-89. Vessels and apparatuses. Norms and methods of strength calculation [Text]. - Introduction. 1990-01-01. - Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2008. 55 p.
8. GOST 8732-78. Seamless, hot-deformed steel pipes [Text]. - Introduction. 1979-01-01. - Moscow: IPK Publishing House of Standards, 1998. - 11 p.
9. Pisarenko, G.S. Handbook of strength of materials, Kyiv, Naukova Dumka, 1988 - 736 p.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лебедева Елена Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой кораблестроения, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 163002, Российская Федерация, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17, e-mail: eg.lebedeva@narfu.ru

Elena G. Lebedeva, Ph. D. (Eng), Assistant Professor, Head of the Department of Shipbuilding, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoi Dviny St., 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: eg.lebedeva@narfu.ru

Медведева Елизавета Сергеевна, бакалавр кафедры кораблестроения, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 163002, Российская Федерация, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17, e-mail: medvedeva.e.s@edu.narfu.ru

Elizaveta S. Medvedeva, Bachelor of the Department of Shipbuilding, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 163002, Russian Federation, Arkhangelsk, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, e-mail: medvedeva.e.s@edu.narfu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 23.12.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.01.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 01.02.2026.

Научная статья

УДК 629.12

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.008>

Анализ рисков, связанных с предварительным определением объемов и стоимости судоремонта

Кашина В.В.¹ lrtof@mail.ru, Бурмистров Е.Г.¹ burmistrov_e_g@mail.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В статье выполняется исследование рисков, имеющих место для судоходных компаний и судоремонтных предприятий при планировании объемов и стоимости судоремонтных работ. Исследованию подлежат вопросы, связанные с ремонтом корпусов судов внутреннего и смешанного плавания, выполняется анализ основных подходов, применяющихся при предварительном определении соответствующих объемов ремонтных работ. В целях детального исследования рисков сформированы их структуры применительно к задачам судоходных компаний и судоремонтных предприятий и определены последствия их проявления. Полученные данные позволили сформировать комплекс мер, направленных на уменьшение вероятности проявления рисков ситуаций, а также на снижение их негативного воздействия в случае проявления рисков в процессе ремонта. С учетом этой информации разработан специализированный алгоритм уменьшения последствий проявления рисков при реализации подходов к предварительному определению объемов работ. Разработанные структуры рисков и предложенные пути их предотвращения и преодоления представляют собой основу для формирования эффективных программ риск-менеджмента для судоходных компаний и судоремонтных предприятий, связанных с планированием и выполнением ремонтных работ на судах.

Ключевые слова: объем ремонта, корпус судна, риск, судоремонтное предприятие, судоходная компания

Финансирование: Исследование выполнено в рамках реализации Государственного задания 06/ГЗ-2025-05 по теме «Научно-исследовательский проект по формированию информационно-технологической платформы "Флот-Сервис-Судоремонт" для судов внутреннего и река-море плавания».

Для цитирования: Кашина В.В., Бурмистров Е.Г. Анализ рисков, связанных с предварительным определением объемов и стоимости судоремонта, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 86—94. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.008.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.008>

Risk analysis related to the preliminary determination of the volume and cost of ship repair

Vera V. Kashina¹ lrtof@mail.ru, Evgeny G. Burmistrov¹ burmistrov_e_g@mail.ru

¹Volga State University of Water Transport

Abstract. The article examines the risks that occur for shipping companies and ship repair companies when planning the volume and cost of ship repair work. The issues related to the repair of the hulls of inland and mixed navigation vessels are subject to research, and the main approaches used in the preliminary determination of the appropriate volumes of repair work are being analyzed. In order to study the risks in detail, their structures have been formed in relation to the tasks of shipping companies and ship repair enterprises and the consequences of their manifestation have been determined. The data obtained made it possible to form a set of measures aimed at reducing the likelihood of risk situations, as well as reducing their negative impact in the event of risks during the repair process. Based on this information, a specialized algorithm has been developed to reduce the consequences of risks in the implementation of approaches to the preliminary determination of work volumes. The developed risk structures and proposed ways to prevent and overcome them form the basis for the formation of effective risk management programs for shipping companies and ship repair enterprises related to the planning and execution of repair work on ships.

Keywords: repair volume, vessel hull, risk, ship repair company, shipping company

Financial Support: The study was carried out within the framework of the implementation of State Assignment 06/ГЗ-2025-05 on the topic "Research project for the formation of the information technology platform "Fleet-Service-Ship Repair" for inland and river-sea navigation vessels."

For citation: Vera V. Kashina, Evgeny G. Burmistrov. Risk analysis related to the preliminary determination of the volume and cost of ship repair, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 86—94. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.008.

Введение

Ремонт является одним из важнейших этапов технической эксплуатации флота [1]. Его качественное и своевременное выполнение в равной степени необходимо как для морских судов, так и для судов внутреннего и смешанного река-море

плавания. Для обеспечения возможности качественной реализации этого этапа, влияющего на обеспечение годного [2] технического состояния судна необходимо принимать во внимание как минимум два основных фактора, актуальных как в настоящее время, так и на среднесрочную перспективу:

- дефицит судоремонтных предприятий, характерно выраженный в межнавигационный период, главным образом применительно к предприятиям полного цикла и выражающийся также в нехватке судоподъемных сооружений;

- стабильно высокие объемы ремонта по различным элементам судов, обусловленные значительным средним возрастом флота внутреннего и смешанного плавания [3].

Именно эти два фактора в достаточной мере обуславливают необходимость качественного предварительного определения объемов предстоящих ремонтных работ и их стоимости. При этом превентивная оценка ожидаемых объемов ремонта является основой для взаимодействия судоводных компаний (далее- СК) с потенциальными предприятиями-исполнителями ремонта в целях заблаговременного заключения соглашений или договоров [4] и планирования расходов. Данные о предстоящих объемах ремонта крайне важны для судоремонтных предприятий (далее- СП) с целью принятия решения о возможности их выполнения силами завода и целесообразности постановки на ремонт конкретного судна, а также в целях проработки вопросов необходимости привлечения подрядных организаций для освоения определенных видов или объемов работ.

Вместе с тем превентивное определение объемов ремонта, находящее отражение в предварительных ремонтных ведомостях, является крайне сложной задачей. Получение информации необходимо по каждому элементу судна, начиная с корпуса и заканчивая радиооборудованием. При составлении предварительных ремонтных ведомостей применяется целый комплекс подходов, действующий при своей реализации и командный состав судна, и береговых специалистов технического профиля, а также ряд инструментов, позволяющих повысить качество предварительной оценки объемов предстоящего ремонта. Очевидно, что решение таких комплексных задач сопряжено с рисками, в результате проявления которых ожидаемые значения объема и стоимости могут измениться. Для качественного управления такими рисками необходимо формирование их структуры с определением потенциальных последствий проявления. Очевидно, что рассмотрение этих показателей для всех элементов судна, то есть для каждого вида ремонтных работ, является объемной задачей. По этой причине целью настоящей статьи является изучение рисков и путей уменьшения последствий их проявления при предварительном определении объемов и стоимости ремонта корпусов судов.

Основные известные подходы, применяемые при предварительной оценке объемов ремонта корпусов судов

Ремонт корпуса является одним из наиболее трудоемких видов ремонта. При этом для проведения ремонта в рамках очередного освидетельствования в соответствии с требованиями Российского Классификационного Общества [2] выбор предприятия-исполнителя осуществляется из основополагающей возможности выполнения на нем ремонта подводной части корпуса, то есть, в том числе, и исходя из наличия на

предприятии судоподъемного сооружения, отвечающего необходимым параметрам. Главным образом это актуально для судов с возрастом более 10-15 лет, освидетельствование которых на плаву не предусмотрено. Притом, что средний возраст отечественного флота превышает отметку в 35 лет, что провоцирует необходимость выполнения значительных объемов ремонта корпусов судов, значительное распространение получает необходимость привлечения подрядных и субподрядных организаций основным заводом-исполнителем для выполнения некоторых объемов этих работ. Таким образом, ремонт корпусов судов требует от предприятия тщательного планирования производства. На судовладельца же такие ожидаемые глобальные объемы ремонта возлагают необходимость их тщательного предварительного определения.

Как показывает практика прогнозирования для судов внутреннего и смешанного плавания разница между прогнозируемым объемом ремонта и объемом ремонта, получаемым в результате дефектации, составляет порядка 7-25 % прогнозной массы металла. А разница между прогнозируемыми и фактически выполняемыми объемами составляет от 15-40%, а в отдельных случаях – до 50% прогнозной массы [5, 6].

На сегодняшний день предварительная оценка объемов ремонта корпусов судов во многих случаях выполняется силами технических менеджеров (технологов) судоводных компаний. Наибольшее распространение получили следующие подходы:

1. Анализ имеющихся на руках ремонтных ведомостей и актов дефектации, составленных в предыдущие периоды;
2. Выполнение предварительной дефектации судна в рейсе на плаву, включающей осмотр корпусных конструкций с внутренней стороны и в доступных местах;
3. Изучение опыта ремонта судов конкретного проекта [5];
4. Применение инструментов прогнозирования.
5. Ввод надбавок на скрытые и труднопрогнозируемые дефекты [7], учет технологических нужд.

Последние два из перечисленных подходов применяются крайне редко, в связи с чем разность между запланированными объемами ремонтных работ и их фактическими значениями остаются различными. Но на разность этих значений влияет также и ряд других причин, имеющих различное происхождение. Именно они могут быть рассмотрены как риски, проявляющиеся при предварительной оценке.

Структурирование рисков при предварительном определении объемов и стоимости судоремонта

В соответствии с ГОСТ Р 51897-2021 (ISO Guide 73:2009). Национальный стандарт Российской Федерации. «Менеджмент риска. Термины и определения» под риском понимается влияние неопределенности на достижение поставленных целей. Под влиянием неопределенности в свою очередь понимается отклонение от ожидаемого результата, которое может быть положительным или отрицательным, может создавать или приводить к возникновению возможностей и угроз. Риск часто

выражается через его источники, потенциальные события и их последствия [8]. Кроме представленного в различных источниках существуют и другие определения риска [9, 10]. В частности риск может быть определен как событие, способное при случае его реализации оказать влияние на ход выполнения проекта [10].

Анализируя распространенные определения с учетом специфики работ ремонта корпусных конструкций можно сформулировать следующие проявления риска при предварительном определении объемов работ и их стоимости:

- неопределенность в области особенностей износов, связанная с отсутствием полного объема информации при предварительном определении объемов;
- наличие возможных ошибок при принятии решений и выполнении работ;
- наличие целевых показателей при достижении результатов операций и возможность наличия отклонений от запланированных значений;
- возможность выполнения количественной оценки последствий проявления рисков, выраженной в эквиваленте массы замененных конструкций, длине сварных соединений, стоимости работ.

Риски, при их рассмотрении подлежат классификации. Существуют ряд критериев для ее выполнения [11].

Применительно к вопросу предварительного определения объемов и стоимости ремонта во внимание приняты следующие группы классификации:

1. По причинам возникновения:

- экономические;
- естественно-природные (экологические);
- технологические;
- риски, связанные с персоналом.

2. По происхождению:

- внешние риски;
- внутренние риски.

3. По возможности прогнозирования:

- предсказуемые риски (сезонные колебания, планируемые изменения в законодательстве);
- непредсказуемые риски (форс-мажорные обстоятельства, экономические кризисы, техногенные аварии).

4. По степени контролируемости:

- неконтролируемые;
- контролируемые;
- частично контролируемые.

5. По наступившим последствиям:

- негативные;
- позитивные;
- смешанные;
- нейтральные.

Обращаясь к неуказанному критерию, характеризующему масштаб воздействия необходимо отметить, что рассмотрению будут подлежать исключительно микрориски, имеющие значение для судовладельца (СК) либо для судоремонтного предприятия как для двух основных сторон при ремонте судна.

Касательно характера наступивших последствий, необходимо отметить, что увеличение предполагаемых объемов и стоимости ремонта для судовладельца будут носить преимущественно негативный характер, а для СП как увеличение, так и уменьшение предполагаемых значений будут иметь и позитивные и негативные проявления, то есть будут носить смешанный характер, переходящий в нейтральный при некоторых условиях (когда плюсы и минусы сопоставимы).

Кроме того, применительно к рассматриваемым видам работ необходимо формализовать структуру [11] для каждого риска в отдельности или для грапп рисков, объединение которых возможно в границах структуры. Общий вид структуры риска, применимый в рамках рассматриваемой задачи представлен на рис.1



Рис. 1 – Общий вид структуры риска

Структурирование рисков может быть реализовано в различных вариациях. Так применительно к настоящей задаче в качестве рисков предлагается рассматривать не отклонение фактически выполняемых объемов ремонта или его стоимости от прогнозных значений, а частные вероятные события, которые могут повлиять на эти объемы. При этом прогнозные значения объемов и стоимости ремонта будут являться целевыми показателями, отклонения от которых целесообразно рассматривать как последствия проявления отдельных рисков. Кроме того, при формировании структур целесообразно рассматривать риски, имеющие место при прогнозировании объемов и стоимости судоремонта дифференцировано для судоходных компаний и для

судоремонтных предприятий. Анализ последствий проявления рисков, имеющих место при предварительном определении объемов и стоимости ремонта представлен в форме табл. 1. Градация рисков выполнена в соответствии с оказанным в результате их проявления влиянием на целевые показатели. Характер результата обозначен соответствующим индикатором («-» - негативный риск; «+» - позитивный, «+/-» - смешанный). Изначально нейтральные риски во внимание не приняты.

Очевидно, что стоимость и объем ремонтных работ являются взаимозависимыми величинами. Тем не менее, в частных случаях изменение одного значения возможно при неизменной величине другого. Так итоговая стоимость работ может быть

отлична от запланированного значения по причине внешнеэкономических или иных факторов, связанных с особенностями условий заключенного

Договора на ремонт. Изменение же объемов ремонта в большинстве случаев влекут за собой и изменение стоимости.

Таблица 1

Анализ последствий проявления рисков, имеющих место при предварительном определении объемов и стоимости ремонта корпусов судов

Наименование организации	Изменение планируемых значений	Характер последствий	Результат
Судоходная компания	Увеличение объема работ	+ (+/-)	-Улучшение технического состояния судна
		- (+/-)	-Увеличение продолжительности ремонта; -Увеличение затрат на ремонт; -Необходимость выполнения доп. работ; -Необходимость поиска исполнителей для доп.объемов при невозможности их освоения силами СП
	Уменьшение объема работ	+ (+/-)	-Экономия средств; -Сокращение сроков ремонта
		- (+/-)	-Меньший процент новых/отремонтированных элементов в корпусе судна
	Увеличение стоимости работ	-	-Увеличение затрат на ремонт; -Необходимость привлечения кредитных средств за счет незапланированного роста затрат на ремонт
	Уменьшение стоимости работ	+	-Экономия средств
Судоремонтное предприятие	Увеличение объема работ	+ (+/-)	-Дополнительная прибыль; -Дополнительная загрузка, при недозагруженности предприятия
		- (+/-)	-Необходимость привлечения подрядных организаций при отсутствии возможности выполнения работ силами СП; -Необходимость обоснования отказа СК при отсутствии возможности выполнения работ силами СП и подрядчиков
	Уменьшение объема работ	+ (+/-)	-Образование резерва для освоения доп.объемов работ по другим судам при их наличии; -Получение средств без выполнения отдельных видов работ, при соответствующих условиях заключенного договора
		- (+/-)	-Уменьшение прибыли; -Необходимость согласования с подрядными организациями, если выполнение ремонта планировалось выполнять их силами
	Увеличение стоимости работ	+	-Дополнительная прибыль
	Уменьшение стоимости работ	-	-Уменьшение прибыли; -Необходимость решения вопросов с источниками отплаты подрядным и проч. организациям

Как видно из табл.1 изменение объемов работ может давать как негативные, так и позитивные последствия для судоремонтных предприятий и судоходных компаний. Так увеличение объемов ремонта, при их обоснованном выполнении, снижает для судовладельца отсроченные риски, связанные с техническим состоянием судна, так как свидетельствуют о необходимости выполнения таких работ исходя из объективных причин (например, наличие скрытых или обнаруженных дефектов). Кроме того, замена существующих конструкций на

новые в большинстве случаев улучшает его техническое состояние. При этом негативное выражение роста объемов находит проявление в незапланированном расходовании средств, для которых, в ряде случаев необходимо прибегать к процедурам кредитования.

Для судоремонтного предприятия рост объемов ремонта, при надлежащем заключении договора, обуславливает для предприятия получение дополнительной прибыли и возможность заполнения пустующих производственных мощностей при

подвижке графиков и планов ремонта. Как негативные можно выделить последствия, связанные с добавлением объемов ремонта, которые завод выполнить не в состоянии.

Уменьшение объемов ремонта преимущественно сказывается на СК положительным образом, позволяя высвободить некоторый объем средств и сократив, при обеспечении ряда условий, сроки ремонта. В тоже время, если уменьшение объемов работ произошло не по объективным причинам и ремонт не выполнен по негодным элементам техническое состояние судна оказывается восстановленным не в полном объеме. Для СП уменьшение может оказать положительное влияние при перегрузке производства. Негативное влияние

заключается в уменьшении прибыли (если это предусмотрено условиями Договора) и необходимости пересогласования условий с подрядными организациями при их привлечении к ремонтным работам.

Увеличение и уменьшение стоимости работ сказывается в большинстве случаев однозначно и на СП и на СК, частные случаи могут быть обусловлены особенностями заключенного Договора.

Для детального изучения рисков необходимо составление их структуры с рассмотрением каждого из них в отдельности. Обобщенная структура рисков, связанных с изменением запланированных значений объемов и стоимости ремонта для судоходных компаний представлена в форме табл.2.

Таблица 2

Обобщенная структура рисков, имеющих место при предварительном определении объемов и стоимости ремонта корпусов судов для судоходных компаний

Происхождение риска	Причина	Наименование риска	Последствия проявления риска	Влияние на целевой показатель
Внешнее/ внутреннее (при ошибках экипажа)	Персонал, технологическая, природно-клим.	Повреждение судна после осмотра при предварительной дефектации	Необходимость доп. ремонта отдельных элементов, его согласование с СП, увеличение сроков ремонта	Увеличение объемов и стоимости ремонта
Внутреннее/ внешнее (при дефектации сторонними специалистами)	Персонал, технологическая	Недостаточная полнота выполнения предварительной дефектации/ ее отсутствие	Необходимость доп. ремонта отдельных элементов, его согласование с СП	Увеличение объемов и стоимости ремонта
Внутреннее	Персонал, технологическая	Принятие при прогнозировании скоростей износа, отличных от фактических значений	Отсутствие необходимости ремонта отдельных элементов, согласование уменьшения объема работ с СП, сокращение сроков	Уменьшение объемов и стоимости ремонта
Внутреннее	Персонал, технологическая		Необходимость доп. ремонта отдельных элементов, его согласование с СП, увеличение сроков ремонта	Увеличение объемов и стоимости ремонта
Внутреннее	Персонал, технологическая	Учет типовых износов и повреждений, характерных для судов проекта при их отсутствии на судне	Отсутствие необходимости ремонта отдельных элементов, согласование уменьшения объема работ с СП, сокращение сроков	Уменьшение объемов и стоимости ремонта
Внешнее (особенности корпуса)	Технологическая	Наличие скрытых дефектов	Необходимость доп. ремонта отдельных элементов, его согласование с СП, увеличение сроков ремонта	Увеличение объемов и стоимости ремонта
Внутреннее	Персонал	Проявление отсутствия комплексного подхода к предварительному объему ремонта	Необходимость доп. ремонта отдельных элементов, его согласование с СП, увеличение сроков ремонта	Увеличение объемов и стоимости ремонта
Внутреннее/ внешнее (со стороны СП)	Персонал	Ошибки в учете технологических нужд/ отсутствие их учета	Необходимость доп. объемов работ, необходимость заказа доп. материала	Увеличение объемов и стоимости ремонта
Внешнее	Персонал, технологическая	Повреждение судна при подъеме на слип	Необходимость доп. объемов работ, необходимость заказа доп. материала	Увеличение объемов работ
Внутреннее/ внешнее	Персонал	Выявление ошибок и скрытых условий в Договоре	Необходимость выполнения дополнительных условий, возможность смещения сроков и изменения объемов работ исполнителем в одностороннем порядке	Увеличение объемов и стоимости ремонта

В качестве результата обозначено влияние риска на целевой показатель, а также, как следствие второго порядка указано влияние на частные процессы внутри организации, для которой рассматривается проявление данного риска. При составлении таблицы принимается во внимание

наиболее распространенная практика определения предварительного объема ремонта силами работников СК..

Аналогичная информация, составленная применительно к СП представлена в форме табл.3.

Таблица 3

Обобщенная структура рисков, имеющих место при предварительном определении объемов и стоимости ремонта корпусов судов для судоремонтных предприятий

Происхождение риска	Причина	Наименование риска	Последствия проявления риска	Влияние на целевой показатель
Внешнее	Персонал, технологическая, природно-климатическая	Недостаточная полнота сведений, отраженных в предварительной ремонтной ведомости, предоставленной СК	Увеличение объемов ремонта, сроков ремонта, необходимость корректировки графиков, заказа доп.материалов, привлечения подрядных организаций без доп. оплаты со стороны СК	Увеличение объемов и стоимости ремонта
Внешнее	Персонал, технологическая	Избыточный объем работ, отраженный в предварительной ремонтной ведомости, предоставленной СК, выполнение которого не требуется	Уменьшение объемов ремонта, сроков ремонта, необходимость корректировки графиков, возникновения остатков материалов, доп.согласования с подрядными организациями по отказу от выполнения работ	Уменьшение объемов и стоимости ремонта (в зависимости от условий Договора)
Внутреннее	Персонал	Ошибки в обработке предварительной ремонтной ведомости, предоставленной СК	Увеличение объемов ремонта, сроков ремонта, необходимость корректировки графиков, заказа доп.материалов, привлечения подрядных организаций без доп. оплаты со стороны СК	Увеличение объемов и стоимости ремонта (в зависимости от условий Договора)
			Уменьшение объемов ремонта, сроков ремонта, необходимость корректировки графиков, возникновения остатков материалов, доп.согласования с подрядными организациями по отказу от выполнения работ	Уменьшение объемов и стоимости ремонта (в зависимости от условий Договора)
Внешнее	Технологическая	Наличие скрытых дефектов	Увеличение объемов ремонта, сроков ремонта, необходимость корректировки графиков, заказа доп.материалов, привлечения подрядных организаций без доп. оплаты со стороны СК	Увеличение объемов и стоимости ремонта
Внешнее/внутреннее	Персонал, природно-климатическая, Технологическая,	Повреждение судна, принятого в ремонт по причине погодных условий, ошибок СП, т.е. по независящим от СК причинам	Увеличение объемов ремонта, сроков ремонта, необходимость корректировки графиков, заказа доп.материалов, привлечения подрядных организаций без доп. оплаты со стороны СК	Увеличение объемов
Внешнее/внутреннее	Персонал	Выявление ошибок и скрытых условий в Договоре	Необходимость выполнения дополнительных условий	Увеличение/уменьшение объемов и стоимости ремонта
Внутреннее/внешнее	Персонал	Ошибки в учете технологических нужд/отсутствие их учета	Необходимость доп. объемов работ, необходимость заказа доп. материала	Увеличение объемов и стоимости ремонта

В табл. 2 и 3 представлены наиболее распространенные риски, имеющие место при планировании ремонта. Как отдельную группу можно рассмотреть риски, проявившиеся при выполнении ремонтных работ, такие как повреждение судна на заводе, выявление скрытых дефектов и т.д. Они оказывают непосредственное влияние на увеличение запланированных объемов и стоимости и, при этом, носят отсроченный характер проявления. Практически все из рассмотренных рисков являются труднопрогнозируемыми, при этом их можно отнести к управляемым, то есть их воздействие от их проявления в большинстве случаев можно скомпенсировать.

Предпосылки для управления рисками, имеющими место при планировании объемов и стоимости ремонта корпусов судов

Для уменьшения последствия влияния отдельных проявлений рисков на итоговый результат необходимо проведение мер по управлению рисками. Они включают в себя две группы действий:

1. Действия, направленные на предотвращение проявления рисков, имеющих негативное проявление;

2. Действия, направленные на уменьшение негативных последствий при возникновении рискованных ситуаций.

Вопросы риск-менеджмента должны прорабатываться индивидуально для каждого проекта или, в рассматриваемом случае, в двух схемах:

- типового проекта по управлению рисками при предварительном определении объемов и стоимости ремонта корпуса судна для компании;

- корректировка типового проекта применительно к условиям конкретного СП и особенностям конкретного судна.

Обобщенный алгоритм уменьшения негативных последствий проявления рисков при реализации каждого из известных подходов к предварительному определению объемов работ и дальнейшей их реализации представлен на рис.2.

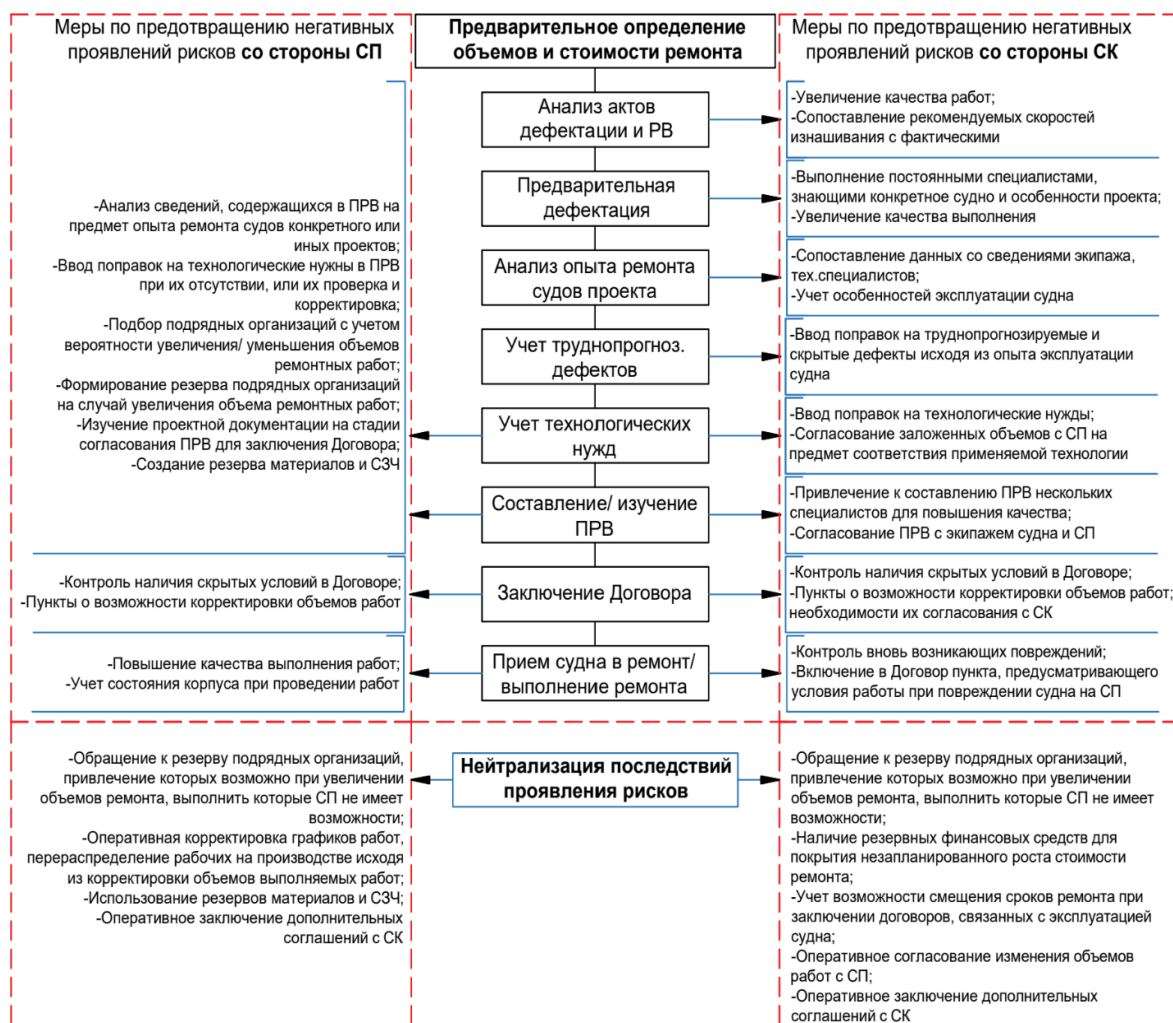


Рис.2 - Обобщенный алгоритм уменьшения последствий проявления рисков при реализации подходов к предварительному определению объемов работ

Очевидно, что целесообразность проведения мер по предотвращению и уменьшению негативного воздействия рисков обусловлена для рисков, имеющих негативные последствия.

В целом для предотвращения основных характерных в исследуемой области рискованных ситуаций необходимо проведение следующих действий:

1.Повышение качества прогнозирования при предварительном определении объемов ремонтных работ. Для этих целей необходим ввод поправок на труднопрогнозируемые дефекты, а также на дефекты, возникновение которых наиболее вероятно;

2.Детальная проработка условий заключаемого на ремонт Договора с включением в него обоюднвыгодных прозрачных условий, как для СК, так и для СП.

3.Создание резерва материалов и подрядных организаций (специалистов) для обеспечения возможности освоения дополнительных объемов работ при высоком риске их возникновения; Вероятность риска при этом может быть оценена качественно, например, с применением метода экспертных оценок.

4.Обеспечение возможности корректировки графиков и планов выполнения ремонтных работ в части гибкости системы при перераспределении работников, оборудования и т.д. в условиях меняющихся объемов на судах, находящихся на слипе.

5.Применение современных технологий, позволяющих обеспечить автоматизацию сопровождения жизненного цикла судов, упростить поиск необходимой информации, сделать оперативным поиск подрядчиков и автоматизировать процессы прогнозирования объемов ремонтных работ.

Для решения последней задачи целесообразно внедрение комплексного подхода [12], основными задействованными в данном случае платформами в котором будут являться модули электронной паспортизации флота и информационно-технологическая платформа «Флот-Сервис-Судоремонт».

Выводы

Планирование объемов судоремонта является крайне важной задачей как для судоходных

компаний, так и для судоремонтных предприятий. Вместе с тем, широкая номенклатура выполняемых в рамках ремонта задач делает процессы прогнозирования трудоемкими. Выполнение их со 100% точностью, исключающей уменьшение или увеличение работ невозможно. В связи с чем необходимо активное внедрение опций риск-менеджмента не только в ход производственных процессов, но также и в процессы, предшествующие им.

Риски, связанные с отклонением фактически выполняемых объемов ремонтных работ в сопоставлении с запланированными актуальны как для СК, так и для СП. При этом для СП их проявление может нести и позитивный эффект, тем не менее, повышая нагрузку на предприятие.

Рассматривая, в качестве примера, предварительное определение объемов ремонта корпусных конструкций, стоит принимать во внимание малоиспользуемые возможности по совершенствованию процессов прогнозирования, в частности, с применением современных цифровых инструментов, позволяющих снизить влияние человеческого фактора, а также уменьшить нагрузку на отдельных специалистов.

Крайне важны вопросы отражения в условиях заключаемых Договоров проявления рисков.

По причине того, что несмотря на все превентивные меры полностью исключить возможность проявления рисков невозможно, важнейшей задачей является работа с их последствиями. Основой ее эффективного выполнения является проработка вопросов наличия кадрового и материального резерва, включая материалы, СЗЧ и финансовые средства.

В целом, риски, характерные для судоремонта являются в большинстве своем управляемыми и позволяют внедрять эффективные меры не только по их предотвращению, но и по уменьшению негативного проявления.

Литература

1. РД 31.20.01-97. Правила технической эксплуатации морских судов. Основное руководство (утв. Минтрансом РФ 08.04.1997 N МФ-34/672)
2. Российское классификационного общество. Правила освидетельствования судов в процессе их эксплуатации. М. – 2019. – 160с.
3. Григорьев, Е.А. Анализ состояния основных средств внутреннего водного транспорта России / Е.А. Григорьев, Р.А. Семенова // Economy and Business: Theory and Practice. – vol. 5-1 (111), 2024 - .С.115- 122.
4. Бурмистров, Е.Г. Постановка оптимизационной задачи выбора предприятия для зимнего судоремонта / Е.Г. Бурмистров, О.К. Зяблов, В.В. Кашина // Речной транспорт (XXI век), №1(105) 2023. – С.26-29.
5. Кашина В.В. Проблема планирования объемов ремонта корпусов судов при наличии труднопрогнозируемых дефектов корпусных конструкций / В.В. Кашина, Е.Г. Бурмистров // Транспорт. Горизонты развития. 2022: Материалы международного научно-практического форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2022. – URL: http://вф-река-море.рф/2022/PDF/5_14.pdf (дата обращения 05.06.2025)
6. Бурмистров Е.Г. Учет погрешностей предварительной оценки объема судоремонта на этапе его планирования / Е.Г. Бурмистров, В.В. Кашина // Судостроение. – 2023. – №5. – С. 74-81.
7. Кашина В.В., Бурмистров Е.Г. Причины возникновения труднопрогнозируемых дефектов и их учет при планировании объемов ремонта корпусов судов // Транспорт. Горизонты развития. 2022: Материалы международного научно-практического форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2022 – URL: [http:// вф-река-море.рф/2022/PDF/5_15.pdf](http://вф-река-море.рф/2022/PDF/5_15.pdf) (дата обращения 25.12.2025)
8. ГОСТ Р 51897-2021 (ISO Guide 73:2009). Национальный стандарт Российской Федерации. Менеджмент риска. Термины и определения" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 11.11.2021 N 1489-ст
9. Карамышев А.Н. Определение понятия «Риск» / Карамышев А.Н., Абросимова Е.В., Улеев А.С. // «Экономика и социум» №3 (16) 2015 – С. 786-789
10. Воронцовский А.В. Управление рисками: Учеб.пособие. 2-е изд., испр. и доп.- СПб.:Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2000; ОЦЭиМ, 2004.- 458 с.

11. Безупречный риск-менеджмент: учебное пособие / В.С. Николаенко. – Томск: Изд-во Томск. Гос. Ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2023. – 140 с.
12. Кашина, В.В. Цифровизация в области технической эксплуатации флота: формирование комплексного подхода / Кашина В.В., Бурмистров Е.Г. // Судостроение. – 2025. - №2. – С. 46-49

References

1. RD 31.20.01-97. Rules of technical operation of marine vessels. Basic Manual (approved by the Ministry of Transport of the Russian Federation 08.04.1997 N MF-34/672)
2. Russian Classification Society. Rules for the inspection of ships in the process of their operation. M. - 2019. – 160s.
3. Grigoriev, E.A. Analysis of the state of fixed assets of inland waterway transport in Russia / E.A. Grigoriev, R.A. Semenova // Economy and Business: Theory and Practice. – vol. 5-1 (111), 2024 - .P.115-122.
4. Burmistrov, E.G. Setting the optimization problem of choosing an enterprise for winter ship repair / E.G. Burmistrov, O.K. Zhablov, V.V. Kashina // River transport (XXI century), №1(105) 2023. – Pp.26-29.
5. Kashina V.V. The problem of planning the volume of repair of ship hulls during the presence of difficult-to-predict defects in hull structures / V.V. Kashina, E.G. Burmistrov // Transport. Horizons of development. 2022: Proceedings of the International Scientific and Practical Forum. VGUVT Federal State Budgetary Educational Institution. - 2022. – URL: http://вф-пека-море .rf/2022/PDF/5_14.pdf (accessed 06/05/2025)
6. Burmistrov E.G. Accounting for errors in the preliminary assessment of the volume of ship repair at the stage of its planning / E.G. Burmistrov, V.V. Kashina // Shipbuilding. – 2023. – No. 5. – pp. 74-81.
7. Kashina V.V. The problem of planning the volume of repair of ship hulls in the presence of difficult-to-predict defects in hull structures / V.V. Kashina, E.G. Burmistrov // // Transport. Horizons of development. 2022: Proceedings of the International Scientific and Practical Forum. VGUVT Federal State Budgetary Educational Institution. - 2022. – URL: http://вф-пека-море .rf/2022/PDF/5_14.pdf (accessed 06/05/2025)
8. GOST R 51897-2021 (ISO Guide 73:2009). The national standard of the Russian Federation. Risk management. Terms and definitions" (approved and put into effect by Rosstandart Order No. 1489-st dated 11.11.2021)
9. Karamyshev A.N. Definition of the concept of "Risk" / Karamyshev A.N., Abrosimova E.V., Uleev A.S. // "Economics and Society" No. 3 (16) 2015 – pp. 786-789
10. Vorontsovsky A.V. Risk management: Textbook.stipend. 2nd ed., ispr. and add. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg University, 2000; OTSEIMR, 2004. 458 p.
11. Impeccable risk management: a textbook / V.S. Nikolaenko. Tomsk: Tomsk State Publishing House. University of Control Systems and Radio Electronics, 2023. 140 p.
12. Kashina, V.V. Digitalization in the field of technical operation of the fleet: the formation of an integrated approach / Kashina V.V., Burmistrov E.G. // Shipbuilding. - 2025. - No. 2. – pp. 46-49

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

Бурмистров Евгений Геннадьевич доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности Волжского государственного университета водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

Evgeny G. Burmistrov Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector for Research and Innovation, Volga State University of Water Transport 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova street, 5, e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

Кашина Вера Владимировна кандидат технических наук, доцент кафедры Проектирования и технологии постройки судов Волжского государственного университета водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: lrtof@mail.ru

Vera V. Kashina, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Design and Technology of Ship Construction, Volga State University of Water Transport, Nesterova, 5, Nizhny Novgorod, 603951, Russian Federation, e-mail: lrtof@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 19.01.2026.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.02.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 12.02.2026.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Научная статья

УДК 536.24

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.009>

Существенное ухудшение теплоотдачи в осесимметричных проточных каналах при имитации пускового режима газотурбинного двигателя

Володин Ю.Г.¹ yu.g.volodin@mail.ru, Матвеев Ю.И.² kaf_eseu@vsuwt.ru

¹Институт морского и речного флота имени Героя Советского Союза М.П. Девятаева - Казанский филиал «Волжский государственный университет водного транспорта», ²Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В статье приводятся результаты экспериментального исследования теплоотдачи и трения в цилиндрической трубе, имитирующей камеру сгорания газотурбинного двигателя. Эксперименты проведены на газодинамическом стенде, который представляет собой аэродинамический контур разомкнутого типа. В качестве генератора теплоты использован плазматрон, изготовленный по однокамерной схеме. Имитация пускового режима проводилась включением плазматрона, который позволяет за короткий промежуток времени получить высокие степени нагрева газового потока до величины энтальпийного фактора 0,25. Резкое увеличение температуры потока до 12000 К/с сопровождается соответствующим изменением величин плотности и вязкости рабочего тела и в итоге увеличением его скорости до 700 м/с². Производные температуры и скорости потока по времени определяют присутствие эффектов тепловой и гидродинамической нестационарности в условиях существенной неизотермичности. В рассматриваемой термогазодинамической обстановке таким образом формируются условия, при которых снижается интенсивность переноса тепла. Детальный анализ экспериментальных данных позволил определить порог, за пределами которого начинает снижаться эффективность теплоотдачи. Этому способствует динамика процесса нарастания температуры потока, начиная с порога 3000 К/с и более.

Ключевые слова: эксперимент, нестационарность, теплоотдача, эффективность теплоотдачи.

Для цитирования: Володин Ю.Г., Матвеев Ю.И. Существенное ухудшение теплоотдачи в осесимметричных проточных каналах при имитации пускового режима газотурбинного двигателя, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 95—99. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.009.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.009>

Significant deterioration of heat transfer in axisymmetric flow channels when simulating the starting mode of a gas turbine engine

Yuriy G. Volodin¹ yu.g.volodin@mail.ru, Yuriy I. Matveyev² kaf_eseu@vsuwt.ru

¹Institute of Maritime and Inland Shipping named after Hero of the Soviet Union M.P. Devyataev - Kazan Branch «Volga State University of Water Transport», Kazan, Russian Federation, ²Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of an experimental study of heat dissipation and friction in a cylindrical pipe simulating the combustion chamber of a gas turbine engine. The experiments were carried out on a gas-dynamic stand, which is an open-type aerodynamic circuit. Plasmatron made according to single-chamber scheme is used as heat generator. Simulation of the starting mode was carried out by turning on the plasmatron, which allows for a short period of time to obtain high degrees of heating of the gas stream to an enthalpy factor of 0.25. A sharp increase in the flow temperature to 12,000 K/s is accompanied by a corresponding change in the density and viscosity of the working fluid and, as a result, an increase in its speed to 700 m/s². The time derivatives of temperature and flow rates determine the presence of thermal and hydrodynamic unsteadiness effects under conditions of substantial non-isothermality. In the considered thermogasdynamic situation, conditions are thus formed under which the intensity of heat transfer decreases. The processing of experimental data made it possible to determine the threshold beyond which the efficiency of heat dissipation begins to decrease. This process is facilitated by the dynamics of the process of increasing the temperature of the stream, starting from a threshold of 3000 K/s or more.

Keywords: experiment, nonstationarity, heat transfer, heat transfer efficiency.

For citation: Yuriy G. Volodin, Yuriy I. Matveyev. Significant deterioration of heat transfer in axisymmetric flow channels when simulating the starting mode of a gas turbine engine. Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 95—99. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.009.

Введение

Эффективность теплоотдачи оценивают параметром аналогии Рейнольдса $S=2St/C_f$, представляющим собой отношение коэффициента теплоотдачи к коэффициенту трения. Известно, что, в условиях внутренней задачи, например, при торможении потока теплоотдача увеличивается, а при ускорении наоборот снижается [1]. Иногда снижение теплоотдачи бывает если предсказуемым, то количественно неожиданным как у профессора Дейча М.Е. при исследовании обтекания сферы. Обнаруженное явление было названо «обратным переходом» или «ламинаризацией» турбулентного пограничного слоя [2]. Удовлетворением интереса к этому явлению явился ряд работ [3-6], в которых явление ламинаризации исследовалось в условиях внутренней задачи и было получено при различных видах воздействий – отрицательный продольный градиент давления, отсос пограничного слоя, охлаждение или нагрев стенки канала и др. Из названных работ выделяется [7], в которой экспериментально исследовалась структура динамического и теплового пограничных слоёв. Оказалось, что при проявлении эффекта ламинаризации турбулентного пограничного слоя, последний остается турбулентным, а механизм турбулентного переноса значительно снижается. В результате, более, чем в два раза снижается величина коэффициента теплоотдачи St и нарушается аналогия Рейнольдса.

Эксперимент

Экспериментальные исследования выполнялись на газодинамическом стенде, представляющим собой аэродинамический контур разомкнутого типа с электродуговым подогревом рабочего тела перед входом в экспериментальный канал. Экспериментальный стенд, экспериментальный канал, диагностическое оборудование подробно описаны в предыдущей статье [8].

Результаты исследований

Резкое увеличение температуры газового потока в потенциальной области с градиентами температуры 12000 K/c и скорости потока 700 м/с² формируют тепловую и гидродинамическую нестационарности, которые, в свою очередь, изменяют величины коэффициентов трения и теплоотдачи (рис. 1-2). С изменением температуры потока изменяются теплофизические свойства рабочего тела такие, как плотность и вязкость, и, следовательно, изменяются параметры пограничных слоёв и течения в целом. В динамическом пограничном слое увеличение температуры потока сопровождается изменением интегральных характеристик [9], а перестройка кинематической структуры потока приводит к увеличению пристеночных касательных напряжений трения [10]. На рисунке 1 представлен график зависимости коэффициента трения в функции характерного числа Рейнольдса. На графике показана следующая динамика исследуемого процесса: 2500 K/c и 150 м/с² (точки обозначены ромбом), 6000 K/c и 350 м/с² (квадрат), 12000 K/c и 700 м/с² (треугольник). Увеличение температуры потока и его динамики приводят к большему

нарастанию величины коэффициента трения, который определялся по выражению:

$$\frac{C_f}{2} = \frac{\tau_w}{\rho_0 w_0^2} \quad (1)$$

Массовая скорость в знаменателе величина

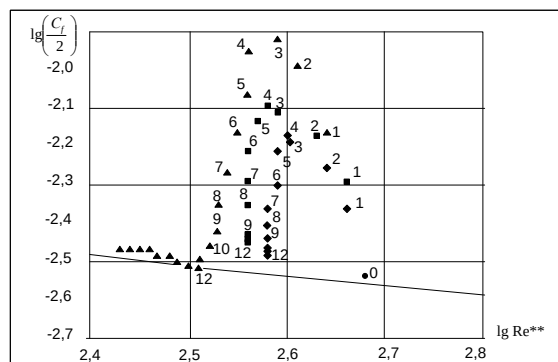


Рис. 1. Зависимость величины коэффициента трения C_f от характерного числа Рейнольдса Re^{**} . Цифры обозначают время: 1 – 0,01 с; 2 – 0,02 с; 3 – 0,03 с; ... 10 – 0,1 с; 12 – 0,12 с

постоянная по условиям эксперимента. Таким образом, коэффициент трения в основном повторяет характер изменения касательных напряжений трения τ_w , которые измерялись методом «трубка-выступ». В эксперименте, кроме перепадов давления на датчиках «трубка-выступ», измерялось полное давление в форкамере P_0^* и статические давления в каждом контрольном сечении, разность которых равна $\Delta P = \frac{\rho_0 w_0^2}{2}$. К моменту времени 0,12 секунды нестационарный процесс можно считать законченным, поскольку экспериментальные точки группируются около стандартной зависимости для турбулентных режимов течения.

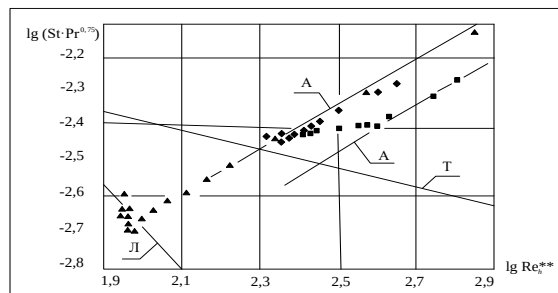


Рис. 2. Зависимость величины коэффициента теплоотдачи St от числа Рейнольдса Re^{**} . Динамика процесса аналогична цифровому обозначению на рис. 1

С увеличением температуры потока формируется тепловой пограничный слой. Измеренные в эксперименте температура потока в приосевой области и температура стенки в функции продольной координаты и времени позволили определить параметры теплового пограничного слоя. Увеличение температуры потока сопровождается прогревом пограничного слоя и увеличением температуры стенки канала. Причем, если с начала эксперимента временная производная температуры стенки канала увеличивается, что вполне логично, то начиная с момента времени 0,06 секунды производная имеет постоянную величину, т.е. стенка канала прогревается с постоянной скоростью.

Плотность теплового потока, определяемая по выражению:

$$q_w = C_{pw} \rho_w \Delta_w \frac{\partial T_w}{\partial t} + \Delta q_w, \quad (2)$$

также имеет постоянную величину с момента 0.06 секунды. Здесь Δq_w – потери тепла, обусловленные свободной конвекцией и лучистым теплообменом, ввиду отсутствия теплоизоляции наружной поверхности канала, которые не превысили 5%. Коэффициент теплоотдачи α определялся по закону Ньютона:

$$\alpha = \frac{q_w}{t_0^* - t_w}, \quad (3)$$

а характеризующий перенос тепла от газового потока к стенкам канала критерий Стантона выражением:

$$St = \frac{q_w}{\rho_0 w_0 (h_0^* - h_w)} \quad (4)$$

На графике рисунка 2 кроме экспериментальных точек построены прямые: Т – стандартный закон теплоотдачи для турбулентных режимов течения:

$$St_0 = \frac{0,128}{Re_h^{*0,25} Pr^{0,75}}, \quad (5)$$

Л – стандартный закон теплоотдачи для ламинарных режимов течения:

$$St_0 = \frac{0,22}{Re_h^{*4/3} Pr^{1/3}}, \quad (6)$$

А – аппроксимационное выражение:

$$\Psi_{zh} = \frac{St}{St_0} = \frac{1}{w_0^2} \frac{\partial w_0}{\partial t} \sqrt{\frac{1}{Re_h^{*}} \frac{1}{\Delta h} \frac{d(\Delta h)}{dt}}.$$

Отслеживая перемещения экспериментальных точек, удалось определить величину производной температуры потока по времени – около 3000 градусов в секунду. С этого порога начинает снижаться величина коэффициента теплоотдачи ниже стандартного значения при увеличении температуры газового потока и уменьшении числа Re_h^{*} . На графике видно, что экспериментальные точки мигрируют в нижний левый угол и группируются около прямой Л. Данный факт свидетельствует о ламинаризации теплового турбулентного пограничного слоя (ТПС). Из анализа выражения (4), по которому определялась величина коэффициента теплоотдачи St , следует, что причиной ламинаризации ТПС является неизотермичность (т.к. массовая скорость и тепловой поток не изменяются во времени) и параметром ламинаризации следует определить температурный фактор ψ_h или температурный напор ΔT . По изменению величины последнего определены границы области ламинаризации ТПС $\Delta T \geq 700$ К и переходной области от 350 до 700 К.

На рисунке 3 построен график, показывающий изменения величины относительного коэффициента теплоотдачи в функции временной координаты. В рассматриваемом самом динамичном режиме относительный коэффициент теплоотдачи изначально принимает наиболее максимальную величину. Его значения, как и в других режимах,

плавно уменьшаются и в отличие от двух других к окончанию нестационарного процесса принимают значение 0,5.

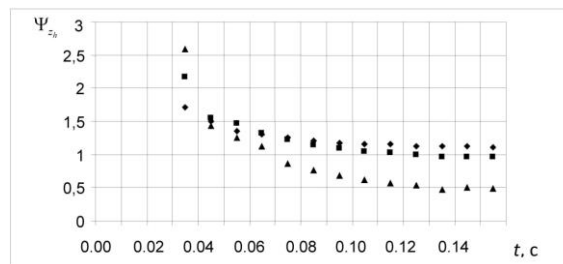


Рис. 3. Изменение во времени величины относительных коэффициентов теплоотдачи Ψ_{zh}

Изменения во времени параметра S аналогии Рейнольдса представлено на графике рис. 4. Во

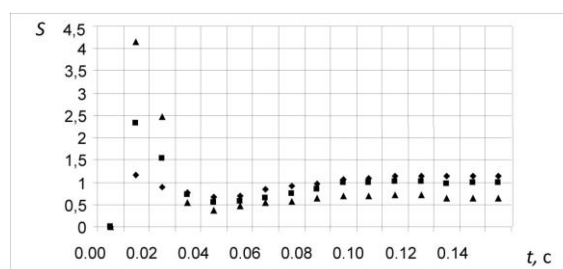


Рис. 4. Изменение во времени величины параметра S аналогии Рейнольдса

всех трех режимах наблюдается нарушение аналогии Рейнольдса, но более существенно это имеет место в третьем режиме, когда S принимает минимальную величину, равную 0,38. Затем ситуация несколько улучшается с небольшим увеличением параметра. В целом в рассмотренной ситуации можно констатировать нарушение аналогии Рейнольдса, в особенности при высокой динамике нарастания температуры газового потока, и, как следствие, существенное снижение эффективности переноса тепла до 50 с лишним процентов. Следует отметить, что в рассмотренном процессе резкого увеличения температуры газового потока, коэффициент трения, как видно на рис. 1, консервативен к происходящему в тепловом пограничном слое.

Заключение

При резком увеличении температуры газового потока формируются тепловая и гидродинамическая нестационарности, причём, чем выше динамика процесса, тем сильнее проявляются эффекты нестационарности, которые совместно с неизотермичностью создают условия по снижению эффективности теплоотдачи.

Литература

1. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое: монография. – М.: Энергия, 1972. – 342 с.
2. Дейч, М.Е., Лазарев, Л.Я. Исследование перехода турбулентного пограничного слоя в ламинарный // Инженерно-физический журнал. – 1964. – Т. 7. – № 4. – С. 18 – 24.
3. Бэк Л.Х., Мэссье П.Ф., Каффел Р.Ф. Ламинаризация турбулентного пограничного слоя при течении в сопле // Ракетная техника и космонавтика. – 1969. – Т. 7. – № 4. – С. 194– 196.
4. Datton R.A. The Effects of Distributed Suction on the Development in Turbulent Boundary Layer // Report and Memoranda № 3155. Cambridge: Engineering Laboratory. – 1958. – 16 p.

5. Wisniewski R.E., Jack J.R. Resent Studies on the Effect of Cooling on Boundary Layers Transition at Mach 4 // J. of the Aerospace Sci. – 1961. – March. – p. 250.
6. Бэнкстон К.А. Переход от турбулентного течения газа к ламинарному в нагреваемой трубе // Труды Американского общества инженеров-механиков серия. Серия: С. Теплопередача. – 1970. – Т. 92 – № 4. – С. 1 – 20.
7. Леонтьев А.И., Шишов Е.В. Закономерности пристенной турбулентности в градиентной области течения и при сложных тепловых граничных условиях // Пристенные турбулентные течения. – Новосибирск: ИТФ, 1984. – С. 105 – 111.
8. Володин Ю.Г., Марфина О.П., Матвеев Ю.И., Гречко Н.В., Салахов И.Р. Экспериментальное исследование теплоотдачи в физической модели камеры сгорания газотурбинного двигателя при его пуске, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 3 часть 1, С. 125–130.
9. Володин Ю.Г., Марфина О.П. Математическое моделирование пусковых режимов энергетических установок. – Санкт-Петербург. Изд. «Инфо-да». 2007. – 128 с.
10. Volodin Yu.G., Fedorov K.S/, Yakovlev M.V. Aircraft and rocket engine theory: Unsteady effects and friction in the starting regime of power plants // Russian Aeronautics – 2006 – № 49(1) – p. 49-52.

References

1. Kutateladze S.S., Leontyev A.I. Teplomassoobmen i trenie v turbulentnom pograničnom sloe. – M.: Energiya, 1972. – 342 s.
2. Deyech M.E., Lazarev L.Ya. issledovanie perekhoda turbulentnogo pograničnogo sloya v laminarniy. // Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. – 1964. – Т. 7. – № 4. – S. 18 – 24.
3. Back L. H., Massier P. F., Kaffel P.F. Laminarizasiya turbulentnogo pograničnogo sloya pri techenii v sope // Raketnaya tekhnika i kosmanavtika. – 1969. – Т. 7. – № 4. – S. 194– 196.
4. Datton R.A. The Effects of Distributed Suction on the Development in Turbulent Boundary Layer // Report and Memoranda № 3155. Cambridge: Engineering Laboratory. – 1958. – 16 s.
5. Wisniewski R.E., Jack J.R. Resent Studies on the Effect of Cooling on Boundary Layers Transition at Mach 4 // J. of the Aerospace Sci. – 1961. – March. – s. 250.
6. Bankston K.A. Perekhod ot turbulentnogo techeniya gaza k laminarnomy v nagrevaemoy trube // Trudy Amerikanskogo obshestva inzhenerov-mekhanikov. Seriya^ C. Teploperedacha. – 1970. – Т. 92 – № 4. – S. 1 – 20.
7. Leontyev A.I., Shishov E.V. Zakonomernosti pristennoy turbulentnosti v gradientnoy oblasti techeniy i pri slozhnikh teplovirh granichnikh usloviykh // Pristennie turbulentnie techeniy. – Novosibirsk^ ITF, 1984. – S. 105 – 111.
8. Yuriy G. Volodin, Olga P. Marfina, Yuriy I. Matveyev, Nikolay V. Grechko, Ilyas R. Salakhov, Experimental study of heat dissipation in physical model of combustion chamber of gas-turbine engine at its start, Marine intellectual technologies. 2024. № 3 part 1, P. 125–130.
9. Volodin Yu.G., Marfina O.P. Mathematical modeling of starting modes of power plants. St. Petersburg: Info-da, 2007. 128 p.
10. Volodin Yu.G., Fedorov K.S/, Yakovlev M.V. Aircraft and rocket engine theory: Unsteady effects and friction in the starting regime of power plants // Russian Aeronautics – 2006 – № 49(1) – p. 49-52.

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 О Б АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Володин Юрий Гурьянович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханических объектов водного транспорта, Институт морского и речного флота имени Героя Советского Союза М.П. Девятаева - Казанский филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта», 420108, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Портовая, 19, e-mail: yu.g.volodin@mail.ru

Yuriy G. Volodin, Ph.D. (Eng), Assistant professor, Assistant professor Department of Electromechanical Facilities of Water Transport, Institute of Maritime and Inland Shipping named after Hero of the Soviet Union M.P. Devyataev - Kazan Branch of the Federal State Financed Educational Institution of Higher Education «Volga State University of Water Transport», 420108, Republic of Tatarstan, Kazan, st. Portovaya, 19, e-mail: yu.g.volodin@mail.ru

Матвеев Юрий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой эксплуатации судовых энергетических установок, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта», 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf_eseu@vsuwt.ru

Yuriy I. Matveyev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Operation of Ship Power Plants, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education «Volga State University of Water Transport», 603951, Nizhny Novgorod, st. Nesterova, 5, e-mail: kaf_eseu@vsuwt.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 24.11.2025
одобрена после рецензирования/approved after reviewing 25.12.2025
принята к публикации/accepted for publication 11.01.2026

Научная статья

УДК 622.6:662.769.21:535.14

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.010>**Инфракрасная система контроля газовых выбросов вредных веществ судовыми энергетическими установками**Туркин В.А.¹ turvla@mail.ru, Привалов В.Е.² vaevpruv@yandex.ru, Шеманин В.Г.¹ vshemanin@mail.ru¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация. Сжиженный природный газ (СПГ) не только способен оптимизировать глобальный энергетический состав, но и стал наиболее широко используемым альтернативным топливом для судовых энергетических установок из-за своих преимуществ, таких как низкие выбросы вредных веществ, техническая отработанность и высокая экономичность. По сравнению с обычным мазутом использование сжиженного природного газа в качестве судового топлива может сократить выбросы NO_x до 90%, выбросы SO_x и твердых частиц почти на 100% и выбросы CO₂ почти на 30%, что может соответствовать все более строгим правилам ИМО по выбросам с судов, а также глобальной цели устойчивого развития. Недостатком СПГ является выброс остатков газового топлива, не полностью сгоревшего в двигателях. Для мониторинга выбросов вредных веществ предлагается использовать измерение их концентрации в газо-воздушной среде по поглощению ими инфракрасного (ИК) излучения в средней части инфракрасного диапазона. Приведены результаты калибровки инфракрасной системы по одному гомологу предельных углеводородов. Экспериментальная проверка допустимости такого подхода проверена по интегральному сечению поглощения молекулы н-гексана. Показано, что предложенный метод градуировки инфракрасной системы по одному компоненту является допустимым для измерения остатков газового топлива, не полностью сгоревшего в двигателях, в пределах установленной погрешности 25 %. Предлагаемая инфракрасная система, в отличие от описанной авторами ранее системы лазерного мониторинга молекул метана лидаром комбинационного рассеяния света, предпочтительней, так как используемые в ней инфракрасные светодиоды дешевле лазеров, имеет небольшие массу и габариты и ее можно встраивать в существующее оборудование при погрешности измерений того же порядка.

Ключевые слова: судовые двигатели, сжиженный природный газ, неполнота сгорания, углеводороды, молекулы, контроль выбросов, инфракрасный детектор, калибровка, молекулы н-гексана

Для цитирования: Туркин В.А., Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Инфракрасная система контроля газовых выбросов вредных веществ судовыми энергетическими установками. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 100—106. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.010.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.010>**Infrared system for monitoring gas emissions of harmful substances from ship power plants**Vladimir A. Turkin¹ turvla@mail.ru, Vadim E. Privalov² vaevpruv@yandex.ru,Valery G. Shemanin¹ vshemanin@mail.ru¹Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Krasnodar region, Russian Federation²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Liquefied natural gas (LNG) not only has the potential to optimize the global energy mix but has also become the most widely used alternative fuel for marine propulsion systems due to its advantages, such as low emissions, technical maturity, and high cost-effectiveness. Compared to conventional fuel oil, the use of LNG as a marine fuel can reduce NO_x emissions by up to 90%, SO_x and particulate matter emissions by nearly 100%, and CO₂ emissions by nearly 30%, thereby meeting increasingly stringent IMO regulations on ship emissions and global sustainable development goals. A disadvantage of LNG is the emission of residual gas fuel, incompletely burned in engines. To monitor emissions of harmful substances, it is proposed to measure their concentration in the gas-air environment based on their absorption of infrared (IR) radiation in the mid-infrared range. The results of calibration of the infrared system for one homologue of saturated hydrocarbons are presented. An experimental verification of the admissibility of this approach was performed using the integrated absorption cross-section of the n-hexane molecule. It has been shown that the proposed method of calibrating an infrared system for one component is acceptable for measuring the residues of gas fuel not completely burned in engines, within the established error of 25%. The proposed infrared system, in contrast to the previously described system of laser monitoring of methane molecules using Raman lidar, is preferable because the infrared LEDs used in it are cheaper than lasers, have a small weight and dimensions, and can be integrated into existing equipment with a measurement error of the same order of magnitude.

Keywords: Marine engines, liquefied natural gas, incomplete combustion, hydrocarbons, molecules, emission control, infrared detector, calibration, n-hexane molecules

For citation: Vladimir A. Turkin, Vadim E. Privalov, Valery G. Shemanin. Infrared system for monitoring gas emissions of harmful substances from ship power plants, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 100—106. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.010.

Введение

Поскольку вопросы экологичности и энергосбережения становятся актуальной темой настоящего времени, морская отрасль сталкивается с колоссальными проблемами. Тяжелое топливо сейчас является основным видом топлива для большинства судов. Оно экономически эффективно, однако его сгорание сопровождается большим количеством выбросов оксидов азота, углерода и серы [1-4]. Соответственно, в 2018 году Международная морская организация (ИМО) инициировала разработку стратегии сокращения выбросов парниковых газов (ПГ) к 2050 году на 50 % по сравнению с 2008 годом, что потребует от судоходной отрасли рассматривать необходимость использования альтернативных источников получения энергии.

Многие виды морского низкоуглеродного или безуглеродного топлива, такие как сжиженный природный газ (СПГ), аммиак, метанол, водород, топливные элементы и биотопливо [5-7], находятся в стадии разработки или применения. Среди них СПГ не только способен восполнить нехватку нефтяных ресурсов и оптимизировать глобальный энергетический состав, но и стал наиболее широко используемым альтернативным топливом для судовых энергетических установок из-за своих преимуществ, таких как техническая отработанность и высокая экономичность [8]. По сравнению с обычным мазутом использование сжиженного природного газа в качестве судового топлива может сократить выбросы NO_x до 90%, выбросы SO_x и твердых частиц почти на 100% и выбросы CO_2 почти на 30%, что может соответствовать все более строгим правилам ИМО по выбросам с судов, а также глобальной цели устойчивого развития [9, 10].

Однако в этом случае недостатком является выброс остатков газового топлива, не полностью сгоревшего в двигателях. Для мониторинга выбросов указанных выше вредных веществ предлагается использовать измерение их концентрации в газовой среде по поглощению ими инфракрасного (ИК) излучения в средней части инфракрасного диапазона.

Измерение концентрации молекул алканов по спектрам инфракрасного поглощения в многокомпонентных газовых смесях нашло свое применение в промышленности [11]. А измерение концентрации молекул метана, являющегося основным компонентом СПГ, используемом в качестве основного топлива для судовых дизельных двигателей, является приоритетной задачей разработки соответствующего газоаналитического оборудования. Следовательно, создание автоматизированных систем для регистрации уровней концентрации молекул метана является основным направлением работ в этой области, что напрямую связано с технологическими процессами эксплуатации судовых энергетических установок на морских судах и безопасностью их обслуживания на береговых промышленных объектах.

Для определения содержания алканов в СПГ, при его использовании в судовых двигателях, а также при хранении или транспортировке используются методические указания [12]. Основным их недостатком является отсутствие инструментального метода измерения в реальном времени для описания физики процесса испарения углеводородов из потока СПГ.

Для проведения измерений в этой области используются датчики, работающие на поглощении инфракрасного излучения исследуемым газом [13-15]. Но приборы для измерения концентрации молекул алканов в сжиженном природном газе в широком диапазоне концентраций с относительной погрешностью не более 25 % и уменьшенными массогабаритными показателями отсутствуют [16].

Поэтому целью настоящей работы являются экспериментальные исследования светодиодной инфракрасной системы для получения зависимости оптической плотности молекул алканов в СПГ на длине волны 3,39 мкм от концентрации исследуемых молекул.

Параметры исследуемых молекул

Основные параметры молекул NO , NO_2 , N_2O_5 , SO_2 , CO , CO_2 и легкие предельные углеводороды (алканы) от метана до гексана – CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , C_5H_{12} , C_6H_{14} приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные параметры исследуемых молекул

Молекула	ν , см^{-1}	λ , мкм	Сечение ИК погло- щения $\epsilon \cdot 10^{18}$ см^2	ПДК, $\text{мг}/\text{м}^3$; см^{-3}
Оксид азота NO	1917,5	5,215	0,67	0,4; $7,8 \cdot 10^{12}$
Диоксид азота NO_2	2605,4	3,838	2,68	0,2; $6,0 \cdot 10^{12}$
Пентаоксид азота N_2O_5	1762(сим)	5,675	-	0,2; $1,1 \cdot 10^{12}$
Диоксид серы SO_2	2499,1	4,001	0,02	0,5; $4,7 \cdot 10^{12}$
Оксид углерода CO	2123,7	4,709	2,8	5,0; $1,1 \cdot 10^{14}$
Диоксид углерода CO_2	2349,3	4,257	-	27000; $3,7 \cdot 10^{17}$
Оксид азота NO	1917,5	5,215	0,67	0,4; $7,8 \cdot 10^{12}$
Метан CH_4	2914(сим)	3,391	0,6	7000; $2,6 \cdot 10^{17}$
Этан C_2H_6	2954	3,348	1,14	50; $5,0 \cdot 10^{15}$
Пропан C_3H_8	2886	3,370	0,8	300; $4,3 \cdot 10^{15}$
Бутан C_4H_{10}	2890	3,372	-	200; $2,1 \cdot 10^{15}$
Пентан C_5H_{12}	2885	3,370	1,12	100; $8,4 \cdot 10^{14}$
Гексан C_6H_{14}	2886	3,369	1,72	60; $4,2 \cdot 10^{14}$

Анализ спектров инфракрасного поглощения молекул оксидов и молекул алканов из спектральных библиотек [17-20] показал, что из-за значительного различия в волновых числах максимумов полос ИК поглощения оксидов и алканов есть возможность для их количественного анализа в сжиженном природном газе, с использованием приведенных в таблице 1 параметров полос поглощения молекул. Однако полосы инфракрасного поглощения алканов имеют близкие значения волновых чисел и при условии, что содержание метана в СПГ превышает 90 %, будем рассматривать его концентрацию как долю всех алканов в сжиженном природном газе.

В исследуемом СПГ компоненты газа могут иметь перекрывающиеся полосы. В этом случае для количественных расчетов концентрации метана будем использовать закон Бугера-Ламберта-Бееера [21] в виде:

$$I = I_0 \exp(-kl), \quad (1)$$

где $\ln(I_0/I)$ – оптическая плотность; $k = \sigma N$ – коэффициент ослабления; σ – показатель поглощения; l – толщина поглощающего слоя; N – концентрация молекул.

Если полоса ИК поглощения оказалась свободной от наложения поглощения других составляющих газовой смеси, то для определения концентрации неизвестной пробы записывают контур выбранной полосы анализируемого вещества и ряда смесей одинакового с пробой состава. Содержание анализируемого вещества в пробе определяется сравнением его спектра со спектром смесей известного состава [21, 22].

Практическое применение данного метода предполагает решение следующих задач: 1) точное определение показателя поглощения требует измерения пропускания излучения с малой погрешностью и точного определения толщины слоя применяемых образцов; 2) точное определение положения линии 100 %-ного пропускания основы образца без анализируемого компонента [21].

Экспериментальные исследования светодиодной ИК системы

Для измерения концентрации исследуемых алканов в СПГ была разработана инфракрасная система для средней области спектра ИК поглощения. Метод измерения оптической плотности газовой среды в инфракрасном диапазоне для определения концентрации алканов реализован в двухлучевой схеме с применением полупроводниковых диодов – светодиода в качестве излучателя на длине волны 3,39 мкм и двух фотодиодов в качестве фотоприемников в измерительном и опорном каналах производства *loffeLed* (Санкт-Петербург, РФ) [23].

Такая ИК система была реализована в одном измерительном объеме с длиной трассы 43 мм. Использование опорного канала позволяет исключить влияния на измеряемый сигнал условий эксплуатации ИК системы и конденсации паров метана на поверхности оптических деталей сенсора. Результаты лабораторных измерений для газозооной смеси разной концентрации C молекул метана в объемных долях или % представлены в таблице 2.

Далее, концентрации в объемных долях были пересчитаны в массовые концентрации C и счетные концентрации N (см. таблицу 2). В последнем столбце таблицы 2 приведены значения счетной концентрации N_c , которые рассчитаны по значениям сечения поглощения молекулы метана из [20] на длине волны 3,39 мкм $\sigma = 0,6 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$.

Таблица 2

Результаты измерений массовой C и счетной N концентраций метана ИК системой в газовой смеси в сравнении с данными, рассчитанными по оптической плотности смеси N_d на длине волны 3,39 мкм

Об. %	D , отн.ед.	C , кг/м ³	N , м ⁻³	N_c , м ⁻³
100	0,442			
90	0,442			
80	0,442	0,570	$2,14E+25$	$2,14E+25$
70	0,388	0,498	$1,87E+25$	$1,88E+25$
60	0,336	0,427	$1,61E+25$	$1,63E+25$
50	0,219	0,356	$1,34E+25$	$1,31E+25$
40	0,154	0,285	$1,07E+25$	$8,95E+24$
30	0,074	0,214	$8,00E+24$	$7,12E+24$
20	0,036	0,142	$5,35E+24$	$1,76E+24$
10	0,036			
0	0			

По измеренным значениям напряжений с фотодиода измерительного канала были рассчитаны значения оптической плотности D газовой смеси для разных значений концентрации метана в смеси. Эта зависимость оптической плотности выглядит практически линейной в области концентраций от 30 до 80 об. %, как это показано на рис. 1.

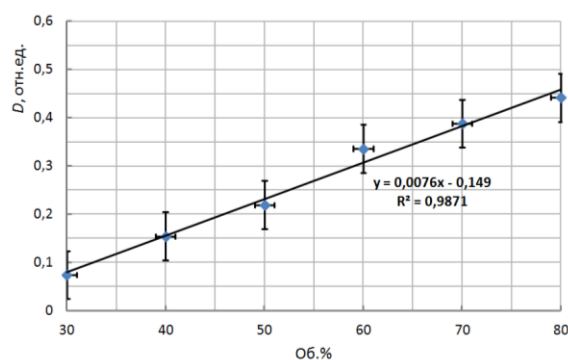


Рис. 1. График зависимости оптической плотности газовой смеси D ИК системы для разной концентрации метана в смеси в об. %.

На рис. 2 приведены графики корреляционных зависимостей между этими значениями концентраций.

Такие же измерения были выполнены для молекул пентана с концентрацией в 1 об. %, а в области линейности ИК поглощения они были пересчитаны в массовые концентрации C и счетные

концентрации N , которые сравниваются с значениями счетной концентрации N_c , рассчитанными по значениям сечения поглощения молекулы пентана из [24] на длине волны 3,39 мкм $\sigma = 1,12 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$.

На рис. 3 приведены графики корреляционных зависимостей между значениями счетных концентраций N , полученными из измеренных значений массовой концентрации пентана в газозвушной смеси, и N_c , полученными из измеренных значений оптической плотности газовой смеси D .

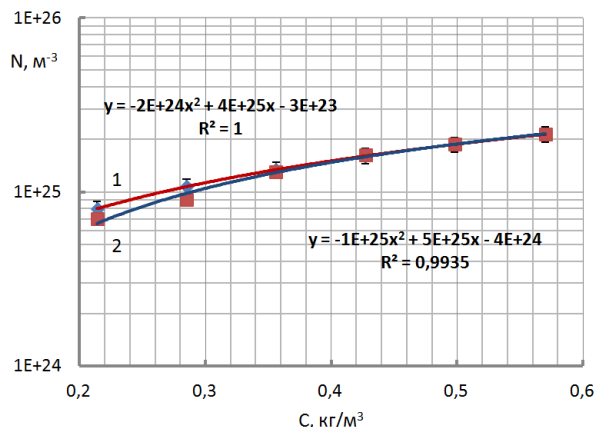


Рис. 2. График корреляционных зависимостей между значениями счетных концентраций N и N_c для разных значений концентрации метана в смеси

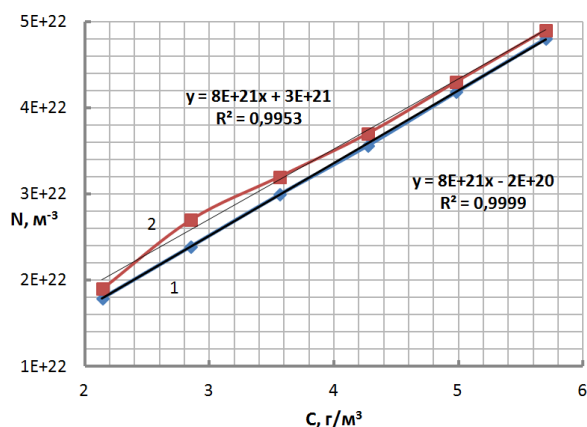


Рис. 3. График корреляционных зависимостей между значениями счетных концентраций N и N_c для разных значений концентрации пентана в смеси ИК системы

Анализ графиков на рис.2 и рис.3 показывает, что для пентана из-за малости концентрации погрешность выше, чем для метана. Это требует оценки погрешностей наших измерений по аналогии с [23], где в качестве калибровочного значения было выбрано сечение поглощения молекулы н-гексана.

Для концентрации 38 г/м^3 и газовой кюветы экспериментальной ИК системы было измерено интегральное сечение поглощения молекулы н-гексана. В качестве образцового метода для оценки метрологических характеристик и погрешности измерения ИК системы был выбран метод газовой хроматографии по методике [22], согласно которой относительная погрешность измерения составляет $\pm 23 \%$. На основании обработки результатов экспериментов было получено, что случайная погрешность многократных измерений ИК системой и на хроматографе (11 г/м^3) составила 3% .

В итоге суммарная погрешность измерений с учетом погрешности измерений, выполненных в соответствии с рекомендациями образцовой методики газохроматографического анализа (23%), рассчитанная по формуле суммирования систематической и случайной погрешностей, составила $23,2 \%$, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 12.1.005-88 для газоаналитического оборудования (в пределах 25%) [25].

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что при калибровке сенсора по сечению поглощения эталонной молекулы измеренные значения концентрации находятся в пределах погрешности $\pm 23 \%$. Воспользуемся этим результатом и будем считать относительную погрешность наших измерений не более 25% .

Заключение

Оценка относительной погрешности инфракрасной системы при градуировке по метану и выполненные ранее экспериментальные измерения суммарной концентрации алканов позволяют сделать вывод о том, что предложенный метод измерения и градуировка системы по одному компоненту допустимы для измерения суммарной концентрации исследуемых молекул в пределах установленной ГОСТ 12.1.005-88 погрешности 25% .

Полученные в работе результаты позволяют использовать инфракрасную систему для мониторинга газозвушных смесей как при использовании сжиженного природного газа в качестве топлива для судовых дизельных двигателей, так и при хранении и транспортировке газового сырья с целью измерения концентрации метана с относительной погрешностью не превышающей 25% .

Предлагаемая инфракрасная система, в отличие от описанной ранее в публикации [26] системы лазерного мониторинга молекул метана лидаром комбинационного рассеяния света, предпочтительней, так как используемые в ней инфракрасные светодиоды дешевле лазеров, имеет небольшие массу и габариты и ее можно встраивать в существующее оборудование при погрешности измерений того же порядка.

Литература

1. Yao S., Li C., Wei Y. Design and optimization of a zero carbon emission system integrated with the utilization of marine engine waste heat and LNG cold energy for LNG-powered ships. Applied Thermal Engineering. 2023. 231. 120976.
2. Modina M.A., Kheckert E.V., Epikhin A.I., Voskanyan A.A., Shkoda V.V., Pismenskaya Yu.V. Ways to reduce harmful emissions from the operation of power plants in special environmental control areas. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, 867. 012104.

3. Крстич С., Модина М.А., Кузнецова Ю.С., Хекерт Е.В., Епихин А.И., Козенкова Г.Л., Карапетян Г.А. Снижение токсичности отработавших газов морских судов // Эксплуатация морского транспорта. 2023. № 1 (106). С. 184-188.
4. Burel F., Taccani R., Zuliani N. Improving sustainability of maritime transport through utilization of Liquefied Natural Gas (LNG) for propulsion. *Energy*. 2013. 57. 412-420.
5. Fan A., Wang J., He Y., et al. Decarbonising inland ship power system: alternative solution and assessment method, *Energy*. 2021. 226. 120266.
6. Xing H., Spence S., Chen H. A comprehensive review on countermeasures for CO₂ emissions from ships, *Renew. Sust. Energy Rev.* 2020. 134. 110222.
7. Wu S., Salmon N., Li M.-M.-J., et al. Energy decarbonization via green H₂ or NH₃? *ACS Energy Lett.* 2022. 7 (3). 1021–1033.
8. Deng J., Wang X., et al. A review of NO_x and SO_x emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels. *Sci. Total Environ.* 2021. 766. 144319.
9. Nahlik M.J., Kaehr A.T., Chester M.V., et al. Goods movement life cycle assessment for greenhouse gas reduction goals. *J. Ind. Ecol.* 2016. 20 (2). 317-328.
10. Balcombe P., Staffell I., Kerdan I.G., et al. How can LNG-fuelled ships meet decarbonisation targets? An environmental and economic analysis. *Energy*. 2021. 227. 120462.
11. Перевозка сжиженного природного газа морским транспортом (танкеры-газовозы). URL: <https://shipshub.com/ru/article/1394-2.html> (дата обращения 06.11.2025).
12. ПНД Ф 13.1:2.3.25-99 (Издание 2005 г.) Методика выполнения измерений массовых концентраций предельных углеводородов C₁–C₁₀ (суммарно в пересчете на углерод), непредельных углеводородов C₂–C₅ (суммарно в пересчете на углерод) и ароматических углеводородов (бензола, толуола, этилбензола, ксилолов, стирола) при их совместном присутствии в атмосферном воздухе, воздухе рабочей зоны и промышленных выбросах методом газовой хроматографии. М., 1999, 25 с.
13. Ахмедов Э.Р., Понуровский Я.Я. Газоанализатор дистанционного измерения концентрации метана на основе диодного лазера ближнего ИК диапазона и выносного оптоволоконного датчика. *Вестник МГТУ МИРЭА*. 2015, № 2 (7), С. 67-82.
14. Загнитко А.В., Мацуков И.Д. Сканирующий инфракрасный анализатор метана и паров углеводородов в атмосферном воздухе. Патент РФ на полезную модель RU 207026. Опубликовано 07.10.2021.
15. Загнитко А.В., Пименов В.В., Федин Д.Ю., Сальников С.Е. Сканирующий инфракрасный анализатор метана и паров углеводородов в атмосферном воздухе. Патент РФ на полезную модель RU 214 288. Опубликовано 19.10.2022. Бюл. № 29.
16. Щербакова С.Н., Венгеров А.С. Анализ методов детектирования утечек метана. *Российский химический журнал*. 2021. Т. LXV. № 4. С. 72-76.
17. National Institute of Standards and Technology. URL: <http://www.webbook.nist.gov> (дата обращения 25.11.2011).
18. Pacific Northwest National Laboratory. URL: <http://www.pnl.gov/> (дата обращения 01.12.2011).
19. HITRAN. URL: <https://hitran.org/xsc/> (дата обращения 01.12.2011).
20. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Мир, 1987. – 550 с.
21. Свердлов Л.М., Ковнер М.А., Крайнов Е.П. Колебательные спектры многоатомных молекул. – М.: Наука, 1970. – 559 с.
22. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 328 с.
23. Васильев А.О., Чартий П.В., Шеманин В.Г. Метрологическое обеспечение инфракрасного детектора выбросов углеводородов в атмосферу // Безопасность в техносфере. – 2012. – № 5. – С. 19-22.
24. Лазерный контроль атмосферы. Под. ред. Э.Д. Хинкли. – М.: Мир, 1979. – 416 с.
25. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (утв. и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 29.09.1988 N 3388) (ред. от 20.06.2000).
26. Туркин В.А., Шеманин В.Г., Краевой А.И. Обнаружение утечек метана из топливных систем судовых дизельных двигателей, работающих на сжиженном природном газе. *Морские интеллектуальные технологии*. 2024. № 1. Т. 1. С. 64-69.

References

1. Yao S., Li C., Wei Y. Design and optimization of a zero carbon emission system integrated with the utilization of marine engine waste heat and LNG cold energy for LNG-powered ships. *Applied Thermal Engineering*. 2023. 231. 120976.
2. Modina M.A., Kheckert E.V., Epikhin A.I., Voskanyan A.A., Shkoda V.V., Pismenskaya Yu.V. Ways to reduce harmful emissions from the operation of power plants in special environmental control areas. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, 867. 012104.
3. Krstic S., Modina M.A., Kuznetsova Yu.S., Heckert E.V., Epikhin A.I., Kozenkova G.L., Karapetyan G.A. Reducing the toxicity of exhaust gases from seagoing vessels. *Operation of marine transport*. 2023. № 1 (106). 184-188.
4. Burel F., Taccani R., Zuliani N. Improving sustainability of maritime transport through utilization of Liquefied Natural Gas (LNG) for propulsion. *Energy*. 2013. 57. 412-420.
5. Fan A., Wang J., He Y., et al. Decarbonising inland ship power system: alternative solution and assessment method, *Energy*. 2021. 226. 120266.
6. Xing H., Spence S., Chen H. A comprehensive review on countermeasures for CO₂ emissions from ships, *Renew. Sust. Energy Rev.* 2020. 134. 110222.
7. Wu S., Salmon N., Li M.-M.-J., et al. Energy decarbonization via green H₂ or NH₃? *ACS Energy Lett.* 2022. 7 (3). 1021–1033.

8. Deng J., Wang X., et al. A review of NO_x and SO_x emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels. *Sci. Total Environ.* 2021. 766. 144319.
9. Nahlik M.J., Kaehr A.T., Chester M.V., et al. Goods movement life cycle assessment for greenhouse gas reduction goals. *J. Ind. Ecol.* 2016. 20 (2). 317-328.
10. Balcombe P., Staffell I., Kerdan I.G., et al. How can LNG-fuelled ships meet decarbonisation targets? An environmental and economic analysis. *Energy.* 2021. 227. 120462.
11. Transportation of liquefied natural gas by sea (gas tankers). URL: <https://shipshub.com/ru/article/1394-2.html> (date of access 06.11.2025).
12. PND F 13.1:2:3.25-99 (2005 edition) Methodology for measuring mass concentrations of saturated hydrocarbons C1–C10 (in total, calculated as carbon), unsaturated hydrocarbons C2–C5 (in total, calculated as carbon) and aromatic hydrocarbons (benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes, styrene) in their combined presence in atmospheric air, air of the working area and industrial emissions using gas chromatography. Moscow, 1999, 25.
13. Akhmedov E.R., Ponurovsky Ya. Gas analyzer for remote measurement of methane concentration based on a near-IR diode laser and a remote fiber-optic sensor. *Bulletin of MIREA Moscow State Technical University.* 2015, № 2 (7). 67-82.
14. Zagnitko A.V., Matsukov I.D. Scanning infrared analyzer of methane and hydrocarbon vapors in atmospheric air. Russian Federation patent for utility model RU 207026. Published 07.10.2021.
15. Zagnitko A.V., Pimenov V.V., Fedin D.Yu., Salnikov S.E. Scanning infrared analyzer of methane and hydrocarbon vapors in atmospheric air. Russian Federation patent for utility model RU 214 288. Published 19.10.2022. *Bull.* № 29.
16. Shcherbakova S.N., Vengerov A.S. Analysis of methane leak detection methods. *Russian Chemical Journal.* 2021. T. LXV. № 4. C. 72-76.
17. National Institute of Standards and Technology. URL: <http://www.webbook.nist.gov> (date of access 25.11.2011).
18. Pacific Northwest National Laboratory. URL: <http://www.pnl.gov/> (date of access 01.12.2011).
19. HITRAN. URL: <https://hitran.org/xsc/> (date of access 01.12.2011).
20. Mezheris R. Laser remote sensing. Moscow, Mir, 1987. 550.
21. Sverdlov L.M., Kovner M.A., Krainov E.P. Vibrational spectra of polyatomic molecules. Moscow, Science, 1970. 559.
22. Smith A. Applied IR Spectroscopy: Translated from English. Moscow. World, 1982. 328.
23. Vasiliev A.O., Charti P.V., Shemanin V.G. Metrological support for an infrared detector of hydrocarbon emissions into the atmosphere. *Safety in the technosphere.* 2012. № 5. 19-22.
24. Laser Monitoring of the Atmosphere. Ed. by E.D. Hinckley. Moscow. Mir, 1979. 416.
25. GOST 12.1.005-88. General sanitary and hygienic requirements for air in the working area (approved and put into effect by the Resolution of the USSR State Standard of September 29, 1988 N 3388) (as amended on June 20, 2000).
26. Turkin V.A., Shemanin V.G., Kraevoy A.I. Detection of methane leaks from fuel systems of marine diesel engines operating on liquefied natural gas. *Marine Intelligent Technologies.* 2024. № 1. V. 1. 64-69

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

Туркин Владимир Антонович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Новороссийск, пр-т. Ленина, 93, e-mail: turvla@mail.ru

Vladimir A. Turkin, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Operation of Ship Mechanical Installations, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin Avenue, 93, Novorossiysk, 353924, Russian Federation, e-mail: turvla@mail.ru

Привалов Вадим Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: vaevpruv@yandex.ru

Vadim E. Privalov, Dr. Sci. (Phys & Math), Professor, Professor of the Department of Physics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, st. Politekhnikeskaya, 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation, e-mail: vaevpruv@yandex.ru

Шеманин Валерий Геннадьевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры Высшая математика и физика, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Новороссийск, пр-т. Ленина, 93, e-mail: vshemanin@mail.ru

Valery G. Shemanin, Dr. Sci. (Phys & Math), Professor, Professor of the Department of Higher Mathematics and Physics, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin Avenue, 93, Novorossiysk, 353924, Russian Federation, e-mail: vshemanin@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 26.11.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 07.01.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 12.01.2026.

Научная статья

УДК 665.76

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.011>

Исследование обводненности судовых моторных масел методом ЯМР-релаксометрии

Корнева И.П.¹ ipk05@mail.ru, Кострикова Н.А.¹ natalia.kostrikova@klgtu.ru¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Обводненность судовых моторных масел является серьезной проблемой, которая может привести к негативным последствиям в работе судовых двигателей и оборудования. Для предотвращения обводненности судовых моторных масел необходимо регулярно проверять качество масла, использовать системы контроля и фильтрации, а также следить за герметичностью систем. Работа посвящена исследованию поведения времени релаксации T_2 в образцах свежего масла Total Disola M4015 после воздействия ультрафиолетового излучения и изучению изменения структуры масляно-водной эмульсии при различном содержании воды. Эксперимент проводился с использованием ЯМР-релаксометра Niumag. Показано, что под влиянием ультрафиолета изменяется структура масла, появляется сигнал от свободной воды, отсутствующий в исходном спектре чистого масла. Анализ показал влияние концентрации воды на стабильность эмульсий: при низкой концентрации выделение свободной воды не наблюдалось, тогда как при больших концентрациях фиксировалось постепенное разделение фаз с образованием капель воды. Исследование демонстрирует критичность проблемы обводненности моторных масел и необходимость мониторинга качества смазочных материалов для предотвращения преждевременного износа техники.

Ключевые слова: судовые моторные масла, ЯМР-релаксометрия, времена релаксации, обводненность, эмульсия, воздействие ультрафиолета.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания Федерального агентства по рыболовству (регистрационный № 125031003359-6)

Для цитирования: Корнева И.П., Кострикова Н.А. Исследование обводненности судовых моторных масел методом ЯМР-релаксометрии, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 107—113. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.011.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.011>

Study of water content in marine motor oils using NMR relaxometry

Irina P. Korneva¹ ipk05@mail.ru, Natalia A. Kostrikova¹ natalia.kostrikova@klgtu.ru¹Kaliningrad state technical University, Russian Federation

Abstract. The water contamination of marine engine oils is a serious problem that can lead to negative consequences in the operation of marine engines and equipment. To prevent water contamination of marine engine oils, it is essential to regularly check the oil quality, use monitoring and filtration systems, and ensure the tightness of the systems. The work is devoted to the study of the T_2 relaxation time behavior in samples of fresh Total Disola M4015 oil after exposure to ultraviolet radiation and to the study of changes in the structure of the oil-water emulsion at different water contents. The experiment was carried out using a Niumag NMR relaxometer. It is shown that under the influence of ultraviolet radiation the structure of the oil changes, a signal from free water appears, which is absent in the initial spectrum of pure oil. The analysis showed the effect of water concentration on the stability of emulsions: at low concentrations, the release of free water was not observed, whereas at high concentrations, gradual phase separation with the formation of water droplets was recorded. The study demonstrates the criticality of the problem of water cut in motor oils and the need to monitor the quality of lubricants to prevent premature wear of equipment.

Key words: marine motor oils, NMR relaxometry, relaxation times, water content, emulsion, ultraviolet exposure.

Financial Support: The research was carried out with financial support from the Federal Fisheries Agency of the Russian Federation (project number 125031003359-6).

For citation: Irina P. Korneva, Natalia A. Kostrikova Study of water content in marine motor oils using NMR relaxometry, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 107—113. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.011.

Введение

Исследование и контроль параметров горюче-смазочных материалов (ГСМ) является неотъемлемой частью любого диагностического процесса на морских судах. Изучение параметров образцов дизельных топлив и масел позволяет на практике обнаруживать многочисленные отклонения от регламентированных показателей [1, 2].

Попадание воды в судовое моторное масло представляет собой серьезную проблему для безопасности мореплавания, поскольку вода негативно влияет на эксплуатационные характеристики масла и общее состояние судовых дизелей. Из-за увеличения нагрузки на двигатель вследствие повышенного трения и снижения эффективности охлаждения потребление топлива увеличивается, что ведёт к росту расходов на эксплуатацию судна.

Проблема обводненности ГСМ (наличия воды) крайне важна для любого транспортного средства [3, 4]. Попадание даже небольших количеств воды в масло способно привести к серьезным последствиям, таким как коррозия, ухудшение смазывающих свойств, увеличение расхода топлива и снижение срока службы оборудования. Вода существенно меняет вязкостные характеристики масла. При попадании воды масло становится менее густым, теряет свою стабильность и устойчивость к высоким температурам. Вязкое масло плохо удерживает защитные слои на поверхностях, подвергаясь сильному износу и повреждениям.

Вода в масле может находиться в трёх основных состояниях: растворённом, эмульгированном и свободном. Эмульсии (смеси воды и масла) отрицательно сказываются на работе двигателей и гидравлических систем. Эмульсия имеет низкую теплопроводность, что затрудняет отвод тепла от нагруженных частей механизмов, повышая температуру нагрева и ускоряя процесс старения масла. Использование стабилизаторов (деэмульгаторов, используемых для разрушения водно-масляных эмульсий) улучшает эксплуатационные характеристики.

В присутствии воды окисление компонентов масла протекает быстрее, образуются кислоты и продукты распада, способствующие накоплению шлаков и продуктов износа, снижению уровня защитных добавок и дальнейшему ухудшению качества масла.

Для эффективного решения этой проблемы необходимы регулярные профилактические мероприятия, применение качественных материалов и использование современного диагностического оборудования.

Известно, что ультрафиолетовые лучи оказывают существенное влияние на структуру и свойства как растительных, так и минеральных масел. Ультрафиолет ускоряет процессы окисления и изменения цвета, образуются свободные радикалы, которые разрушают структуру масла. Так, в работах [5, 6] сообщается о влиянии УФ-излучения на структурно-чувствительные свойства оливкового и льняного масел.

Установлено, что минеральные масла менее подвержены воздействию ультрафиолета благодаря своей химической устойчивости. Однако, длительное воздействие этих лучей также вызывает изменение физико-химических свойств. Особенно актуально это для технических смазочных материалов, используемых в многочисленных промышленных и производственных областях.

В работе [7] сообщается о разложении сырой нефти на поверхности воды под действием УФ-лучей. Изменения в окружающей среде, происходившие при этом, изучались методами флуоресценции и газовой хроматографии.

Кроме сырой нефти деградации под воздействием ультрафиолета подвержены и нефтепродукты.

Нефтяное дизельное топливо изменяет молекулярный состав и как следствие физико-химические параметры при неограниченном доступе воздуха. Для исследования использовался метод газовой хроматографии в сочетании с масс-спектрометрией [8]. Выявлено изменение

содержания кислородсодержащих соединений, также показано их влияние на качество дизельного топлива при долгосрочном хранении.

Одними из современных высокоинформативных методов исследования веществ являются методы ЯМР-спектроскопии [9, 10]. Метод ядерной магнитно-резонансной релаксометрии (ЯМР-релаксометрии) имеет большое значение в различных областях промышленности и находит широкое применение в химической отрасли, сельском хозяйстве, транспорте и многих других сферах экономики. В нефтяной промышленности ЯМР-релаксометрия выступает как источник сведений о физико-химических свойствах и компонентном составе нефти [11, 12]. ЯМР-релаксометрия используется для анализа реологических свойств нефти и определения компонентного состава.

Так, в работе [13] ЯМР-релаксометрия применялась для идентификации и исследования характеристик сырой нефти. Отмечается, что данный метод отличается надежностью и имеет ряд преимуществ перед другими. Во-первых, он является неразрушающим, во-вторых, не требующим длительной специальной подготовки образцов, что является экономически целесообразным. Быстрота и простота выполнения измерений с помощью оригинального программного обеспечения также принадлежат к преимуществам ЯМР-релаксометрии. Физические характеристики, такие как кинематическая вязкость, плотность, содержание серы, общее кислотное число, показатель преломления, удельный вес, содержание асфальтенов, микроуглеродный остаток и т.д. определяются благодаря эмпирической корреляции между свойствами нефти и экспериментальными значениями релаксации ЯМР.

Этот метод давно с успехом применяется для исследования не только нефти, но и нефтепродуктов. В работе [14] приведен анализ особенностей молекулярно-группового состава минеральных масел, позволяющий предсказывать эксплуатационные качества будущего смазочного материала и оценивать совместимость масла-пластификатора с каучуками. Методом импульсной низкочастотной ЯМР-релаксации установлен молекулярно-групповой состав 11 образцов минеральных масел и рассчитаны соотношения ароматических и неароматических углеводородов в них.

Целью настоящей работы было исследование времен релаксации T_2 образцов свежего масла Total Disola M 4015 до и после воздействия ультрафиолетового излучения. Кроме того, изучалось поведение эмульгированной воды в масле при различной концентрации воды в эмульсии. Также исследовалась гигроскопия моторного масла. Подобные подходы при исследовании времен релаксации ГСМ в литературе не описаны и результаты, приводимые в настоящей работе, являются новыми.

Материалы и методы

В работе использовался ЯМР-релаксометр Niumag с пакетом программного обеспечения. В качестве образцов использовались пробы свежего масла Total Disola M 4015 для высоко- и среднеоборотных дизелей судов.

Для воздействия ультрафиолетовым излучением на образцы использовалась ртутная лампа с длиной волны в ультрафиолетовой части спектра 254 нм.

В работе использовались эмульсии масла и воды с концентрациями воды 4,9 %, 5,42 % и 8,93 %. В стеклянные пробирки наливалось свежее масло, масса которого определялась с помощью аналитических весов. Затем добавлялась дистиллированная вода. Измерялись спектры времен релаксации T_2 масла с водой. Масло и вода тщательно взбивались в течение 15 минут с помощью специального устройства. Измерялись времена релаксации T_2 через определенные промежутки времени.

Для изучения влияния ультрафиолета на масло последнее наливалось в стеклянную емкость диаметром 60 мм. Высота слоя масла составляла 3 мм. На расстоянии 10 мм от поверхности масла располагалась ртутная лампа. По истечении времени измерялись времена релаксации T_2 .

Результаты и обсуждение

Как видно из рис. 1 форма сигнала после облучения ультрафиолетом образца масла существенно меняется. После облучения в течение 30 мин на графике видно раздвоение пика масла и появление сигнала от воды (табл. 1). Время релаксации масла уменьшается. Еще через полчаса наблюдается уменьшение амплитуды сигналов от масла и воды и изменение времен релаксации. Через сутки после облучения график незначительно отличается от графика, полученного после облучения масла в течение 60 мин.

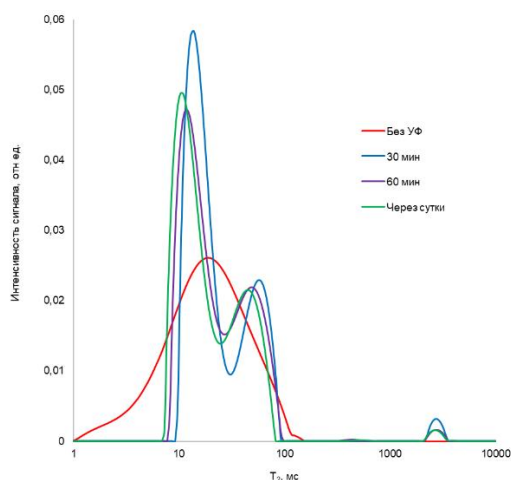


Рис. 1. Распределение времен релаксации T_2 образца Total Disola M 4015 до и после облучения ультрафиолетом

Для расчета процента содержания воды использовалась формула из [15]

$$x = \left(\frac{I_B \cdot T_{2M}}{I_B \cdot T_{2M} + I_M \cdot T_{2B}} \right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где T_{2M} - время релаксации масла, T_{2B} - время релаксации воды, I_M - интенсивность сигнала масла, I_B - интенсивность сигнала воды.

Таблица 1

Времена релаксации T_2 (мс) масла Total Disola M 4015 до и после облучения ультрафиолетом

До облучения УФ	Облучение УФ 30 мин	Облучение УФ 60 мин	Через сутки после облучения УФ	Через 24 дня после облучения УФ
18,252	13,667 2643,081	11,490 2800,504	10,844 2643,08	10,844 2494,50

После облучения ультрафиолетом ЯМР-релаксометр зарегистрировал сигнал от воды в масле, содержание которой составило 0,0276 %. Через сутки после воздействия процентное содержание воды уменьшилось в 1,09 раза. Это значит, что часть воды из свободного состояния в масле перешла в растворенное.

Объяснить данное явление можно следующим образом. Под действием оптического излучения в топливах происходят реакции окисления, так называемое фотоокисление [16 - 17]. В результате чего возникают свободные радикалы, являющиеся инициаторами окислительных процессов. Кроме того, имеются сообщения о том, что облучение окружающего воздуха глубоким ультрафиолетовым излучением приводит к образованию капель воды при разных температурах [18]. Явление происходило в широком диапазоне температур. Для образования капель воды достаточно было очень слабого ультрафиолетового излучения (0,5 Вт).

В случае облучения поверхности моторного масла ультрафиолетом через слой воздуха происходили одновременно два процесса: образование в воздухе капель воды [18] и интенсивное образование углеводородных радикалов в масле [16, 19, 20]. Углеводородные радикалы вступают в различные химические реакции, среди которых взаимодействие с водой в воздухе играет существенную роль. Радикалы могут захватывать молекулы воды, образуя гидроксил-группы и новые соединения.

Ультрафиолетовое излучение способствует повышению гигроскопичности масел, этот эффект связан с деградацией масла под действием ультрафиолета. В результате окисления и других процессов под воздействием излучения, масло изменяет свои свойства и становится более восприимчивым к поглощению влаги. Так, в работе [20] показано воздействие УФ-света, вызывающего химические превращения в трансформаторном масле, что приводит к изменению свойств масла.

Ионизированные продукты окисления масла образуются под действием ультрафиолета и представляют собой химические соединения, возникающие в результате взаимодействия масла с кислородом воздуха. Когда масло подвергается окислению, оно образует кислые и катионные группы, которые способны притягивать и удерживать молекулы воды. В статье [21] отмечается, что существует три возможных пути попадания воды в моторное масло: проникновение конденсата из воздуха, при сгорании топлива и при попадании воды из системы охлаждения.

Таким образом, на рис. 1 мы наблюдаем появление воды в масле и образование соединений

вследствие разрушения молекул масла. Растворённая вода присутствует в виде диспергированных микрокапель, эмульгированная вода – в виде эмульсии в водно-масляной фазе, а свободная вода – это количество воды, находящейся на дне топливных баков [22].

В работе было изучено поведение эмульсии масла с водой при различных концентрациях воды методами ЯМР-релаксометрии. На рис. 2 представлены графики распределения времен релаксации T_2 эмульсии (5,42 %).

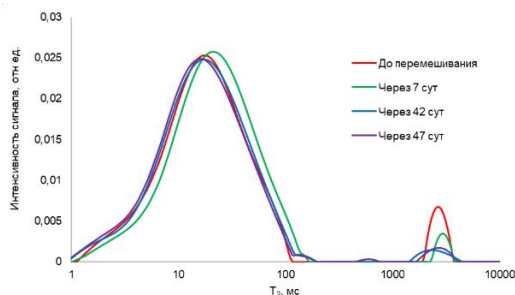


Рис. 2. Распределение времен релаксации T_2 в эмульсии образца Total Disola M 4015 при концентрации воды 5,42 %

Как видно из рис. 2, амплитуда сигнала от масла через неделю несколько увеличивается относительно амплитуды масла до перемешивания с водой. Время релаксации масла незначительно уменьшается. В дальнейшем время релаксации масла стабилизируется. Амплитуда воды в свободном состоянии до образования эмульсии примерно в два раза больше амплитудного значения эмульгированной воды через 7 дней. Время же релаксации воды в эмульсии с течением времени сначала увеличивается, затем уменьшается и в конечном итоге приближается к значению T_2 воды в свободном состоянии до образования эмульсии. Визуально на дне пробирки наблюдаются капли воды под слоем масла.

На рис. 3 представлен график изменения времени релаксации T_2 масла в эмульсии (концентрация воды 8,93 %). Время релаксации масла T_2 в эмульсии плавное уменьшается со временем, приближаясь к значению свежего масла, не смешанного с водой. Более чем через 40 суток на дне пробирки также образуется свободная вода.

В случае с эмульсией с наименьшей концентрацией воды (4,9 %) пика воды на графиках не наблюдается. За 60 дней наблюдения вода в свободном состоянии на дне пробирки не появилась.

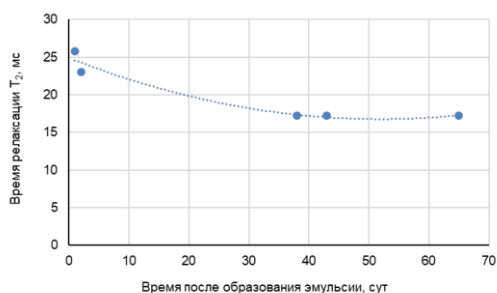


Рис. 3. График изменения времени релаксации T_2 масла в эмульсии образца Total Disola M 4015 при концентрации воды 8,93 %

Кроме того, были проведены исследования гирроскопии моторных масел. Масло Total Disola M 4015 объемом 30 мл в стеклянной пробирке было помещено в стеклянный сосуд со 100 мл дистиллированной воды. Сосуд плотно закрывался крышкой. Относительная влажность воздуха в герметичной емкости через некоторое время составила 100 %. Распределение времен релаксации T_2 чистого масла Total Disola M 4015 представлено на рис. 4 и в табл. 2.

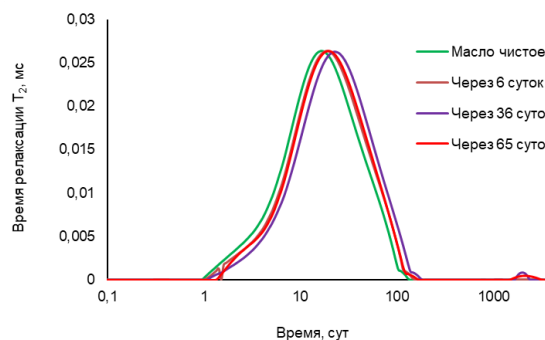


Рис. 4. Распределения времени релаксации T_2 чистого масла Total Disola M 4015

Таблица 2

Времена релаксации T_2 (мс) масла Total Disola M 4015 до и после облучения ультрафиолетом

До поглощения	Через 6 суток	Через 36 суток	Через 66 суток
16,258	19,339 1109,75	23,004 1979,167	10,844 2643,081

Закключение

В работе исследованы времена релаксации T_2 эмульсии масла Total Disola M 4015 с водой различных концентраций. Поведение эмульсии (выделение свободной воды на дне сосуда) зависит от концентрации воды в эмульсии. При концентрации воды более 5% воды через 40 дней вода становится свободной.

Под действием ультрафиолета в свежем масле образуется свободная вода, в то время как ЯМР-релаксометр ее не обнаруживает до воздействия ультрафиолета на масло. Образование воды обусловлено деградацией масла под действием УФ-лучей и повышением его гигроскопичности.

При помещении масла с открытой поверхностью в сосуд с водой масло поглощает воду.

Таким образом, обводненность масла - серьезная проблема для двигателей и других технических устройств, требующих качественной смазки и защиты от коррозии. Масло с высоким содержанием воды теряет свои эксплуатационные свойства, такие как вязкость, устойчивость к окислению и смазочные характеристики. Это ведёт к повышенному износу деталей, снижению эффективности оборудования и даже выходу его из строя.

Литература

1. Nikolay Sinyavsky, Oksana Synashenko, Ivan Mershiey, Aleksander Bulychyev, Natalia Kostrikova, Study of the Hydrocarbons Molecular Structure in Marine Diesel Fuels Using FTIR and NMR Methods, Journal of Eta Maritime Science, 2025, Vol. 13, no. 2, pp. 115 – 121, DOI: <https://doi.org/10.4274/jems.2025.20270>
2. D. Glushkov, N. Ya. Sinyavsky, and N. A. Kostrikova, Dispersion Analysis of Ferromagnetic Particles in Used Motor Oils, Journal of Friction and Wear, 2025, Vol. 46, No. 3, pp. 185–190. DOI: 10.3103/S1068366625700503, <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068366625700503>
3. Сыроедов Н.Е., Галко С.А., Шарыкин Ф.Е., Муратханов Н.А. (2016). Обводненность синтетических масел для авиационной техники. Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации, № 225(3), 74-79.
4. Шилин Б.И. (2017). Причины обводнения моторного масла при эксплуатации двигателей транспортно-технологических машин лесного комплекса. Актуальные проблемы лесного комплекса, № 48, 20-23.
5. Кожевников В.И., Канунникова О.М., Михайлова С.С., Макаров С.С., Дементьев В.Б. (2013). Влияние магнитного поля и УФ-излучения на структурное состояние и биологические свойства олеиновой кислоты и оливкового масла. Химическая физика и мезоскопия, Т. 15, № 4, 598-602.
6. Кожевников В.И., Дементьев В.Б., Саламатов Е.И., Аксенова В.В., Геровская Г.А. (2012). Влияние магнитного поля и ультрафиолетового излучения на структурное состояние и биологическую активность оливкового и льняного масел. Химическая физика и мезоскопия, Т. 14, № 4, 599-603.
7. Hui Liu, Bing Sun, Zhi Yu Yan, Xiao Yu Tian (2012). UV Induced Degradation of Crude Oil in Polluted Water Based on Analysis of Environmental Materials. Advanced Materials, Vol. 534, 333-336. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.534.333>
8. Rafał Janus, Karol Kołomański, Mariusz Wądrzyk, Marek Lewandowski. (2019) Degradation of petroleum diesel fuel accelerated by UV irradiation: the impact of ageing on chemical composition and selected physicochemical properties, E3S Web Conf. 108 02003. DOI: 10.1051/e3sconf/201910802003.
9. Эрнст Р., Боденхаузен Дж., Вокаун А. ЯМР в одном и двух измерениях. М., изд. «Мир», 1990, 709 с.
10. Воронов В.К., Сагдеев Р.З. Основы магнитного резонанса. Иркутск, Вост.-Сиб. кн. изд., 1995, 352 с.
11. Turakhanov A., Shumskayte M., Glinskikh V., Fursenko E. (2016) NMR relaxometry potential for oil rheological properties evaluation and component composition determination. The 8th International Siberian Early Career GeoScientists Conference (Novosibirsk, Russia, 13-24 June 2016): Proceedings of the Conference, 334-335.
12. Шумскайте М.Й., Бурухина А.И., Чернова Е.С., Глинских В.Н., Фурсенко Е.А. (2019). Групповой состав нефти по данным ЯМР-релаксометрии и его сопоставление с результатами жидкостной хроматографии и ИК-спектроскопии. Геофизические технологии, № 3. 13-21. <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2019-3-13>.
13. Talha Furkan Canan, Salim Ok, Waleed Al-Bazzaz, Shunmugavel Ponnuswamy, Michael Fernandes, Mustafa Al-Shamali, Ali Qubian, Alexander Sagidullin (2022). Rapid characterization of crude oil by NMR relaxation using new user-friendly software. Fuel, Vol. 320, 123793.
14. Фазлыяхматов М.Г., Шаманов И.Н., Сахаров Б.В., Хасанова Н.М., Варфоломеев М.А., Самосоров Г.Г., Пастухов М.О. (2023). Определение содержания ароматических углеводородов в минеральных маслах методом ЯМР-релаксации. Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. Науки, Т. 165, кн. 2, 322–339. doi: 10.26907/2542- 064X.2023.2.322-339.
15. Harris R.K. (1983) Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, John Wiley & Sons
16. Förster, Eva & Becker, Johanna & Dalitz, Franz & Görling, Benjamin & Luy, Burkhard & Nirschl, Hermann & Guthausen, Gisela. (2015). NMR Investigations on the Aging of Motor Oils. Energy & Fuels, Vol. 29, № 11, 7204-7212. doi: 10.1021/acs.energyfuels.5b02164.
17. Willian L.G. da Silva, Acacia A. Salomao, Marta M. D. C. Vila and Matthieu Turbino. (2016). Influence of Water and Ultraviolet Irradiation on the Induction Period of the Oxidation of Biodiesel. J. Braz. Chem. Soc., 28 (4).
18. Yoshihara K, Takatori Y, Miyazaki K, Kajii Y. (2007) Ultraviolet light-induced water-droplet formation from wet ambient air. Proc Jpn Acad Ser B Phys Biol Sci, 83(9-10):320-5. doi: 10.2183/pjab/83.320.
19. Идрисов Т.С., Курбанов М.А., Кулиева У.А. (2020). Изучение воздействия УФ излучения на смолы и асфальтеновые фракции сырой нефти методом ИК спектроскопии. Оптика и спектроскопия, Т. 128, № 12, 1969-1972.
20. Джаванширова А.А., Искендерова З.И., Абдуллаев Э.Т., Гурбанов М.А. (2017). Влияние уф-света и γ-излучения на физико-химические параметры отработанного технического трансформаторного «Совтол-10» и конденсаторного «Совол» масел. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, № 5-2, 243-247.
21. Корнеев С.В., Пашукевич С.В. (2021). Влияние воды на изменение показателей качества моторного масла. Вестник СибАДИ, Т. 18, № 4(80), 406-415. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-406-415>.
22. Marcos Antonio Polinarski, Andressa Caroline Neves, Adriana Fiorini, Fábio Rogério Rosado, Edson Antonio da Silva, Helton José Alves. (2022). Ultraviolet radiation as an antimicrobial treatment in Brazilian diesel oil: Effect of biodiesel, sulfur, and water contents. Fuel, Volume 308, 122076.

References

1. Nikolay Sinyavsky, Oksana Synashenko, Ivan Mershiey, Aleksander Bulychyev, Natalia Kostrikova, Study of the Hydrocarbons Molecular Structure in Marine Diesel Fuels Using FTIR and NMR Methods, Journal of Eta Maritime Science, 2025, Vol. 13, no. 2, pp. 115 – 121, DOI: <https://doi.org/10.4274/jems.2025.20270>

2. A.D. Glushkov, N. Ya. Sinyavsky, and N. A. Kostrikova, Dispersion Analysis of Ferromagnetic Particles in Used Motor Oils, *Journal of Friction and Wear*, 2025, Vol. 46, No. 3, pp. 185–190. DOI: 10.3103/S1068366625700503, <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068366625700503>
3. Syroedov N.E., Galko S.A., SHarykin F.E., Murathanov N.A. (2016). Obvodnennost' sinteticheskikh masel dlya aviacionnoy tekhniki [Water availability of synthetic oils for aviation equipment]. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoj aviatsii*, № 225(3), 74-79.
4. SHilin B.I. (2017). Prichiny obvodneniya motornogo masla pri ekspluatatsii dvigatelej transportno-tekhnologicheskikh mashin lesnogo kompleksa. [The reasons for the watering of engine oil during the operation of engines of transport and technological machines of the forest complex]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, № 48, 20-23
5. Kozhevnikov V.I., Kanunnikova O.M., Mihajlova S.S., Makarov S.S., Dement'ev V.B. (2013). Vliyanie magnitnogo polya i UF-izlucheniya na strukturnoe sostoyanie i biologicheskie svoystva oleinoy kisloty i olivkovogo masla. [Influence of magnetic field and UV radiation on the structural state and biological properties of oleic acid and olive oil]. *Himicheskaya fizika i mezoskopiya*, T. 15, № 4, 598-602.
6. Kozhevnikov V.I., Dement'ev V.B., Salamatov E.I., Akseanova V.V., Gerovskaya G.A. (2012). Vliyanie magnitnogo polya i ul'traioletovogo izlucheniya na strukturnoe sostoyanie i biologicheskuyu aktivnost' olivkovogo i l'nyanogo masel. [Influence of magnetic field and ultraviolet radiation on the structural state and biological activity of olive and linseed oils]. *Himicheskaya fizika i mezoskopiya*, T. 14, № 4, 599-603/
7. Hui Liu, Bing Sun, Zhi Yu Yan, Xiao Yu Tian (2012). UV Induced Degradation of Crude Oil in Polluted Water Based on Analysis of Environmental Materials. *Advanced Materials*, Vol. 534, 333-336. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.534.333>.
8. Rafał Janus, Karol Kołomański, Mariusz Wądrzyk, Marek Lewandowski. (2019) Degradation of petroleum diesel fuel accelerated by UV irradiation: the impact of ageing on chemical composition and selected physicochemical properties, *E3S Web Conf.* 108 02003. DOI: 10.1051/e3sconf/201910802003.
9. Ernst R., Bodenhausen Dzh., Vokaun A. YAMR v odnom i dvuh izmereniyah. [NMR in one and two dimensions]. M., izd. «Mir», 1990, 709 s.
10. Voronov V.K., Sagdeev R.Z. Osnovy magnitnogo rezonansa. [Fundamentals of magnetic resonance]. Irkutsk, Vost.-Sib. kn. izd., 1995, 352 s.
11. Turakhanov A., Shumskayte M., Glinskikh V., Fursenko E. (2016) NMR relaxometry potential for oil rheological properties evaluation and component composition determination. The 8th International Siberian Early Career GeoScientists Conference (Novosibirsk, Russia, 13-24 June 2016): Proceedings of the Conference, 334-335.
12. SHumskajte M.J., Buruhina A.I., CHernova E.S., Glinskikh V.N., Fursenko E.A. (2019). Gruppovoy sostav nefti po dannym YAMR-relaksometrii i ego sopostavlenie s rezul'tatami zhidkostnoy hromatografii i IK-spektrometrii. [The group composition of oil according to NMR relaxometry and its comparison with the results of liquid chromatography and IR spectrometry]. *Geofizicheskie tekhnologii*, № 3. 13-21. <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2019-3-13>.
13. Talha Furkan Canan, Salim Ok, Waleed Al-Bazzaz, Shunmugavel Ponnuswamy, Michael Fernandes, Mustafa Al-Shamali, Ali Qubian, Alexander Sagidullin (2022). Rapid characterization of crude oil by NMR relaxation using new user-friendly software. *Fuel*, Vol. 320, 123793.
14. Fazlyjyahmatov M.G., SHamanov I.N., Saharov B.V., Hasanova N.M., Varfolomeev M.A., Samosorov G.G., Pastuhov M.O. (2023). Opredelenie sodержaniya aromaticeskikh uglevodorodov v mineral'nyh maslah metodom YAMR-relaksatsii. [Determination of aromatic hydrocarbons in mineral oils by NMR relaxation]. *Uchen. zap. Kazan. un-ta. Ser. Estestv. Nauki*, T. 165, kn. 2, 322–339. doi: 10.26907/2542- 064X.2023.2.322-339.
15. Harris R.K. (1983) *Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, John Wiley & Sons
16. Förster, Eva & Becker, Johanna & Dalitz, Franz & Göring, Benjamin & Luy, Burkhard & Nirschl, Hermann & Guthausen, Gisela. (2015). NMR Investigations on the Aging of Motor Oils. *Energy & Fuels*, Vol. 29, № 11, 7204-7212. doi: 10.1021/acs.energyfuels.5b02164.
17. Willian L.G. da Silva, Acacia A. Salomao, Marta M. D. C. Vila and Matthieu Turbino. (2016). Influence of Water and Ultraviolet Irradiation on the Induction Period of the Oxidation of Biodiesel. *J. Braz. Chem. Soc.*, 28 (4).
18. Yoshihara K, Takatori Y, Miyazaki K, Kajii Y. (2007) Ultraviolet light-induced water-droplet formation from wet ambient air. *Proc Jpn Acad Ser B Phys Biol Sci*, 83(9-10):320-5. doi: 10.2183/pjab/83.320.
19. Idrisov T.S., Kurbanov M.A., Kulieva U.A. (2020). Izuchenie vozdejstviya UF izlucheniya na smoly i asfal'tenovyie frakcii syroy nefti metodom IK spektroskopii. *Optika i spektroskopiya*, T. 128, № 12, 1969-1972.
20. Dzhavanshirova A.A., Iskenderova Z.I., Abdullaev E.T., Gurbanov M.A. (2017). Vliyanie uf-sveta i γ-izlucheniya na fiziko-himicheskie parametry otrabotannogo tekhnicheskogo transformatornogo «Sovtol-10» i kondensatornogo «Sovol» masel. [The effect of UV light and gamma radiation on the physico-chemical parameters of spent technical transformer "Sovtol-10" and capacitor "Sovol" oils]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij*, № 5-2, 243-247.
21. Korneev S.V., Pashukevich S.V. (2021). Vliyanie vody na izmenenie pokazatelej kachestva motornogo masla. [The effect of water on changes in engine oil quality indicators]. *Vestnik SibADI*, T. 18, № 4(80), 406-415. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-406-415>.
22. Marcos Antonio Polinarski, Andressa Caroline Neves, Adriana Fiorini, Fábio Rogério Rosado, Edson Antonio da Silva, Helton José Alves. (2022). Ultraviolet radiation as an antimicrobial treatment in Brazilian diesel oil: Effect of biodiesel, sulfur, and water contents. *Fuel*, Volume 308, 122076.

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

Корнева Ирина Павловна, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры физики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: ipk05@mail.ru

Irina P. Korneva, Ph.D. (Techn), Assistant Professor, Professor of the Department of physics, Kaliningrad state technical University, Sovetsky av., 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: ipk05@mail.ru

Кострикова Наталья Анатольевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru.ru

Natalia A. Kostrikova, Ph.D. (Phys & Math), Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of physics, Kaliningrad state technical University, Sovetsky av., 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.12.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 12.01.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 21.01.2026.

Научная статья

УДК 621.43.074

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.012>

Методика количественной оценки выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух двухтопливными автомобильно-железнодорожными паромами проекта CNF19M

Говорухин В.П.^{1,2} vgovoruhin@iptran.ru, Соколов Ю.П.² ypsokolov@mail.ru, Ильина Н.Н.¹ innmail@mail.ru, Быстрова Н.Ю.³ ecol@spbrc.nw.ru

¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, ²Научно-исследовательский институт синтетического каучука имени академика С.В. Лебедева, ³Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук

Аннотация. В статье представлен анализ экологической эффективности инновационных двухтопливных автомобильно-железнодорожных паромов проекта CNF19M, эксплуатирующихся на морской паромной линии «Усть-Луга – Балтийск». Суда оснащены главными двигателями Wärtsilä 12V34DF мощностью 6000 кВт, способными работать как на сжиженном природном газе, так и на малосернистом дизельном топливе. Применённая в исследовании методика расчёта выбросов загрязняющих веществ, основанная на проектной документации, спецификациях топлива и нормативных требованиях Приложения VI к конвенции MARPOL 73/78, позволила количественно оценить экологические преимущества двухтопливной энергетической установки. Расчёты выполнены для 40-часового рейса протяжённостью 420–450 морских миль при 75 % нагрузке двигателей. Результаты демонстрируют, что переход с дизельного на газовое топливо обеспечивает снижение выбросов углекислого газа на 25 %, диоксида серы на 100 %. Также переход с дизельного на газовое топливо обеспечивает практически полное исключение оксидов азота и твёрдых частиц. Паромы соответствуют стандарту IMO Tier 2 и получили классификацию экопаромов (знак класса ECO) и сертификат морских автономных надводных судов – МАНС. Разработанная методика расчёта может быть использована для оценки экологической эффективности других судов с двухтопливными двигателями. Внедрение таких технологий рассматривается как стратегический шаг к декарбонизации морского транспорта и обеспечению устойчивой транспортной связанности Калининградской области в условиях современных логистических вызовов.

Ключевые слова: Международная морская организация, загрязняющие вещества, атмосферный воздух, двухтопливные автомобильно-железнодорожные паромы проекта CNF19M, морская паромная линия «Усть-Луга – Балтийск».

Финансирование: работа выполнена в рамках исполнения государственного задания ИПТ РАН № 075-00605-26-00 на 2026 год и плановый период 2027 и 2028 годов за счет средств предоставленной Минобрнауки России субсидии (соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 20.01.2026 № 075-03-2026-498), государственного задания НИИСК № 075-00573-26-00 на 2026 год и на плановый период 2027 и 2028 годов за счет средств предоставленной Минобрнауки России субсидии (соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 20.01.2026 № 075-03-2026-425) и государственного задания СПбНЦ РАН № 075-00614-26-00 на 2026 год и на плановый период 2027 и 2028 годов за счет средств предоставленной Минобрнауки России субсидии (соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 20.01.2026 № 075-03-2026-477)

Для цитирования: Говорухин В.П., Соколов Ю.П., Ильина Н.Н., Быстрова Н.Ю. Методика количественной оценки выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух двухтопливными автомобильно-железнодорожными паромами проекта CNF19M. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 114–119. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.012.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.012>

Methodology for Quantitative Assessment of Pollutant Emissions into the Atmosphere from Dual-Fuel Road-Rail Ferries of Project CNF19M

Valery P. Govorukhin^{1,2} vgovoruhin@iptran.ru, Yury P. Sokolov² ypsokolov@mail.ru, Nataliya N. Ilina¹ innmail@mail.ru, Nataliya Yu. Bystrova³ ecol@spbrc.nw.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences, ²S.V. Lebedev Synthetic Rubber Research Institute, ³Saint Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

Abstract. The article presents an analysis of the environmental efficiency of innovative dual-fuel road-rail ferries of project CNF19M operating on the sea ferry route "Ust-Luga – Baltiysk". The vessels are equipped with Wärtsilä 12V34DF main engines with a capacity of 6,000 kW, capable of operating on both liquefied natural gas (LNG) and low-sulfur marine diesel oil. The emission calculation methodology applied in the study—based on design documentation, fuel specifications, and regulatory requirements of Annex VI to the MARPOL 73/78 Convention—enabled a quantitative assessment of the environmental advantages of the dual-fuel power plant. Calculations were performed for a 40-hour

voyage covering 420-450 nautical miles at 75% engine load. The results demonstrate that switching from diesel to gas fuel reduces carbon dioxide (CO₂) emissions by 25% and sulfur dioxide (SO₂) emissions by 100%. The transition to gas fuel also ensures a near-complete elimination of nitrogen oxides (NO_x) and particulate matter (PM). The ferries comply with the IMO Tier II standard and have been awarded the eco-ferry classification (ECO class notation) and a certificate for Maritime Autonomous Surface Ships (MASS). The developed calculation methodology can be applied to assess the environmental performance of other vessels equipped with dual-fuel engines. The implementation of such technologies is regarded as a strategic step toward decarbonizing maritime transport and ensuring sustainable transport connectivity for the Kaliningrad region amid contemporary logistical challenges.

Keywords: International Maritime Organization, pollutants, atmospheric air, dual-fuel road–rail ferries of Project CNF19M, Ust-Luga–Baltiysk sea ferry route.

Financial Support: the work was carried out under the state assignment of the IPT RAS № 075-00605-26-00 for 2026 and the planned period of 2027 and 2028 funded by a subsidy provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement on the provision of subsidies from the federal budget for financial support for the implementation of the state task dated 20 January 2026 № 075-03-2026-498), the FSBI “ISR” state assignment № 075-00573-26-00 for 2026 and for the planning period of 2027 and 2028 years at the expense of a subsidy provided by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (agreement on the provision of subsidies from the federal budget for financial support of the implementation of state assignment from 20 January 2026 № 075-03-2026-425) and the state assignment of the SPbRC RAS № 075-00614-26-00 на 2026 год and for the planning period of 2027 and 2028 at the expense of the subsidy provided by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (agreement on the provision of subsidies from the federal budget for financial support of the fulfillment of state assignment № 075-03-2026-477 dated January 20, 2026)

For citation: Valery P. Govorukhin, Yury P. Sokolov, Nataliya N. Ilina, Nataliya Yu. Bystrova. Methodology for Quantitative Assessment of Atmospheric Pollutant Emissions from Dual-Fuel Road–Rail Ferries of Project CNF19M Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 114—119. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.012.

Введение

Анализ отчётов Всемирной метеорологической организации (ВМО) свидетельствует о непрерывном росте уровня парниковых газов, обусловленном деятельностью человека. Наличие в атмосфере большого количества парниковых газов оказывает значительное влияние на изменение климата, что создаёт угрозы экономической деятельности. Международная морская организация (ИМО) ограничивает уровни выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферный воздух (АВ) от судовых энергетических установок (СЭУ). Ограничения отражены в Приложениях IV и VI Конвенции MARPOL 73/78 от 19.05.2005 г. Оснащение судов двухтопливными двигателями, использующими газовое и жидкое топливо, позволяет обеспечивать возможность снижения выбросов ЗВ в АВ [1,2]. В качестве газового топлива может быть использовано любое углеводородное топливо, имеющее при температуре 37,8°C абсолютное давление насыщенных паров по Рейду 0,28 МПа и выше [2].

Особенности и технические характеристики паромов проекта CNF19M

По заказу ФГУП «Росморпорт» были построены два инновационных парома проекта CNF19M, которые с 2022 г. эксплуатируются на морской паромной линии «Усть-Луга – Балтийск» в целях обеспечения переориентации части грузопотока в Калининградскую область в связи с ограничением транзита ряда грузов в регион. Паромы проекта CNF19M предназначены для перевозки железнодорожных составов российского стандарта, а также других накатных грузов. Ледовый класс Arc4 позволяет судам осуществлять морскую перевозку круглогодично без сопровождения ледокола. По сравнению с аналогичными судами на традиционном топливе СЭУ паромов используют в качестве топлива сжиженный природный газ (СПГ) или дизельное топливо с низким содержанием серы, что позволяет снизить выбросы ЗВ в АВ: углекислого газа на 20-30

%, оксидов азота – более чем на 90 %, оксидов серы и сажи – практически полностью. Преимущества двухтопливных двигателей состоят в возможности перехода с дизельного топлива на газовое топливо, а в случае перебоев в подаче газа двигатель продолжит работать на жидком топливе; переход с одного вида топлива на другое осуществляется автоматически [1].

Паромы оснащены системами дистанционного управления с применением элементов автономной навигации и подтверждением этого факта получением в 2023 г. удостоверения морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС). Автономный режим управления паромами обеспечивает созданный в Санкт-Петербурге центр дистанционного управления автономными судами [3].

Формула класса судов – KM*Arc4 AUT1-ICS OMBO ECO GFS Ro-ro ship [4,5], где:

KM – класс Российского морского регистра судоходства;

Arc4 – арктический ледовый класс, судно способно работать в Арктическом регионе;

AUT1 – первый класс автоматизации судна;

ICS – информационная система безопасности;

OMBO – одномоторная бортовая опора (для ролкеров);

ECO – экологичность, используемое судном топливо – сжиженный природный газ;

GFS – Gaz Fuel Ship – газовое топливо;

Ro-ro ship – ролкер, судно, предназначенное для перевозки колесной техники.

Паромы оснащены двумя главными двигателями марки Wartsila 12V34DF мощностью по 6000 кВт, которые могут работать на СПГ и на традиционном дизельном топливе с содержанием серы не более 0,1%. Факт двухтопливности позволяет отнести суда к классу эколопаромов [6].

Для расчета выбросов ЗВ в АВ в статье рассмотрена морская паромная линия «Усть-Луга – Балтийск» протяженностью 420 – 450 морских миль, точная протяженность маршрута может

незначительно отличаться в зависимости от конкретных навигационных условий и выбранного курса, время прохождения паромом пути составляет примерно 38-40 часов.

Ключевые этапы паромного маршрута следующие: начальная точка пути – расположенный в юго-восточной части Финского залива порт Усть-Луга, далее судно следует на юго-запад, выходит из Финского залива и по Балтийскому морю следует в Калининградский залив, завершая путь в порту Балтийск Калининградской области.

Рассматриваемые перевозки паромов отнесены к мультимодальным, поскольку часть пути до морской паромной переправы, и после ее прохождения грузы перевозятся различными видами транспорта с возможностью оформления единого документа перевозки.

Расчёт выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух на маршруте морской паромной линии «Усть-Луга – Балтийск»

Расчёт выбросов ЗВ в АВ произведен с некоторыми допущениями. Рассматриваем траекторию морской части маршрута (опуская маневрирование в портах) для автомобильно-железнодорожного парома проекта CNF19M, оборудованного двумя двухтопливными главными двигателями 12V34DF Wartsila стандарта Tier 2, где Tier 2 – стандарт IMO по выбросам оксидов азота (NO_x) для судовых дизельных двигателей, зависящий от номинальной частоты вращения двигателя; уровень 2 стандарта ограничивает выбросы оксидов азота (NO_x) от 14,4 до 7,7 г/кВт·ч [7,8].

Допустимые требования к характеристикам газового топлива отражены в таблице 1 [9].

Таблица 1

Спецификация газового топлива для двухтопливных двигателей WÄRTSILÄ 34DF

Свойство	Единица измерения	Величина
Низшая теплотворная способность (НТС), минимум ¹⁾	МДж/м ³ Н ²⁾	28
Метановое число, минимум ³⁾		80-90
Содержание метана (CH_4), минимум	% объема	70
Содержание сероводорода (H_2S), максимально	% объема	0,05
Содержание водорода (H_2), максимум ⁴⁾	% объема	3
Содержание аммиака, максимум	мг/м ³ Н	25
Содержание хлора + фтора, максимум	мг/м ³ Н	50
Механические примеси на подводе к двигателю, максимум	мг/м ³ Н	50
Механические примеси на подводе к двигателю, максимальный размер	микрон	5
Температура газа на входе	°С	0...60
Недопустимо содержание на подводе к двигателю воды и углеводов ⁵⁾		

Примечание

1) Необходимое давление газа зависит от НТС.

2) Величины приведены в м³Н (Нормальный кубический метр – внесистемная единица измерения количества вещества, которое в газообразном состоянии занимает один кубический метр при условиях, называемых «нормальными условиями») для данных условий при 0°С и 101,3 кПа.

3) Метановое число – расчетная величина, обеспечивающая масштаб для оценки устойчивости топливных газов к помпажу. Приведенная выше таблица действительна для двигателя, оптимизированного под низкое метановое число.

4) Содержание водорода выше 3% по объему необходимо рассматривать для каждого проекта в отдельности.

5) Точка росы природного газа ниже минимальных рабочих температуры и давления.

Отработавшие газы двухтопливного двигателя в основном состоят из азота, углекислого газа (CO_2) и водяного пара с небольшим количеством угарного газа (CO), оксидов серы (SO_x), оксидов азота (NO_x), частично прореагировавших и несгоревших углеводородов и твердых частиц.

Для расчета выбросов ЗВ в АВ от двигателей в различных режимах использованы данные, приведенные в Проектном руководстве (далее ПР) [9] и в других источниках.

В соответствии с ПР для расчета использовались величины низшей теплотворной способности топлива. Под термином «низшая теплотворная способность» понимается показатель, характеризующий количество теплоты, выделяемой при полном сгорании топлива массой 1 кг без учета энергии, выделяющейся при конденсации водяного пара, содержащегося в продуктах сгорания.

Для расчетов взята реальная величина НТС для газового топлива, приведенная для двигателя Wärtsilä 12V34DF мощностью 6000 кВт, равная 49620 кДж/кг [9]. НТС дизельного топлива составляет 42,6 МДж/кг.

Объемы выбросов оценивались по двум компонентам: углекислому газу и диоксиду серы.

Количество углекислого газа M_{CO_2} , образующегося при полном сгорании топлива с массой M рассчитано по формуле

$$M_{\text{CO}_2} = \frac{M * k * 44}{12},$$

где k – коэффициент массового содержания углерода в топливе, 44 – молекулярная масса углекислого газа, 12 – атомная масса углерода. Коэффициент k рассчитан, исходя из брутто-формулы углеводородного топлива.

Для дизельного топлива k составляет 0.857.

Количество образующегося диоксида серы M_{SO_2} рассчитано, исходя из процентного содержания серы в топливе C_s и массы топлива M по формуле

$$M_{SO_2} = \frac{M * C_s * 64}{100 * 32},$$

где 64 – молекулярная масса диоксида серы, 32 – атомная масса серы.

В расчёте использованы данные для дизельного топлива с содержанием серы, не превышающем 0,1 % по массе.

Природный газ, используемый в качестве газового топлива, является довольно сложной газовой смесью, его состав может изменяться в широких пределах, коэффициент k зависит от содержания в газовом топливе метана и более тяжелых углеводородных газов (этана, пропана и т.д.). Для расчетов использована величина $k \approx 0.77$, что соответствует содержанию метана в топливе выше 70% и, соответственно, средней молекулярной массе газового топлива 19.6 [9].

В газовом топливе сера входит в состав сероводорода H_2S с максимальным содержанием 0,05 % от объема газового топлива (см. таблицу 1) [9]. Исходя из столь незначительного объема серы расчет оксида серы для газового топлива не выполнялся.

Масса газового топлива M_g , необходимая для обеспечения необходимой мощности двигателя в течение одного часа, определена по формуле

$$M_g = \frac{3600 * P}{49620},$$

где P – мощность двигателя (кВт), а 49620 – НТС газового топлива в кДж/кг;

Объем выбросов углекислого газа за 1 час получен, исходя из необходимой массы газового топлива, рассчитанной по предыдущей формуле, и коэффициента массового содержания углерода, по формуле

$$M_{CO_2} = \frac{M_g * 0.77 * 44}{12},$$

где величина коэффициента 0.77 соответствует содержанию метана в газовом топливе порядка 70 % объема.

Расчетные выбросы углекислого газа и диоксида серы при использовании дизельного топлива при различных нагрузках для двигателя Wärtsilä 12V34DF мощностью 6000 кВт за 1 час работы приведены в таблице 2.

Расчетные выбросы углекислого газа и диоксида серы при использовании газового топлива при различных нагрузках приведены в таблице 3.

Таблица 2

Расчетные выбросы углекислого газа и диоксида серы при использовании дизельного топлива за час

Нагрузка, %	Расход топлива, кг/кВт*ч	Расход топлива суммарный, кг	Выброс углекислого газа, кг	Выброс диоксида серы, кг, не более
50	0.182	1092	3432	2.18
75	0.180	1080	3396	2.16
100	0.186	1121	3526	2.24

Таблица 3

Расчетные выбросы углекислого газа и диоксида серы при использовании газового топлива за час

Нагрузка, %	Энергопотребление, кДж/кВт*ч	Суммарный объем газового топлива, м³	Суммарная масса газового топлива, кг	Выброс углекислого газа, кг	Выброс диоксида серы, кг, не более
50	7562	1281	914	2582	-
75	7467	1265	903	2549	-
100	7286	1234	881	2487	-

Данные расчета выбросов загрязняющих химических веществ в атмосферу на маршруте «Усть-Луга – Балтийск», исходя из предполагаемого

40-часового времени его прохождения и 75% нагрузке двигателя Wärtsilä 12V34DF мощностью 6000 кВт приведены в таблице 4.

Таблица 4

Суммарные выбросы загрязняющих химических веществ в атмосферу при прохождении парами маршрута морской паромной линии «Усть-Луга – Балтийск»

Нагрузка, %	Для дизельного топлива		Для газового топлива	
	Выброс углекислого газа, кг	Выброс диоксида серы, кг, не более	Выброс углекислого газа, кг	Выброс диоксида серы, кг, не более
75%	135840	86.4	101970	-

Заключение

На основании анализа экологической эффективности мультимодальных перевозок на морской паромной линии «Усть-Луга – Балтийск» с использованием инновационных двухтопливных

автомобильно-железнодорожных паромов проекта CNF19M выявлено снижение выбросов 3В в АВ при использовании газового топлива по сравнению с использованием дизельного топлива.

Расчёты, выполненные применительно к 40-часовому рейсу при 75 % нагрузке главных

двигателей, демонстрируют, что переход на газовое топливо позволяет снизить эмиссию углекислого газа на 25 % и практически полностью сократить выбросы диоксида серы. При этом выбросы оксидов азота и твёрдых частиц практически исключаются, что подтверждает экологический статус судов.

Представленная в статье методика количественной оценки выбросов ЗВ в АВ позволяет оценить экологическую безопасность морских перевозок при эксплуатации двухтопливных судов с использованием дизельного и газового топлива.

Внедрение двухтопливных технологий в морских перевозках вносит существенный вклад в

достижение целей устойчивого развития и декарбонизации транспортного сектора. Благодаря возможности эксплуатации на СПГ данные суда соответствуют современным требованиям Приложения VI к конвенции MARPOL 73/78.

В условиях санкционных ограничений и необходимости обеспечения транспортной связанности Калининградской области с основной территорией Российской Федерации двухтопливные автомобильно-железнодорожные паромы проекта CNF19M играют стратегическую роль, совмещая логистическую эффективность с рациональным воздействием на окружающую среду.

Литература

1. Говорухин В.П., Таранцев А.А., Родионов В.А., Королев О.А. Применение альтернативных видов топлива для обеспечения экологической безопасности морских судов // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – Т. 1, № 1(67). – С. 75-81.
2. Правила классификации и постройки морских судов: в 18 ч. Ч. 3. Устройства, оборудование и снабжение // Российский морской регистр судоходства. – Санкт-Петербург: РМРС, 2015. – 188 с.
3. Официальный Интернет-ресурс Министерства транспорта Российской Федерации [Электронный ресурс]. – URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11489> (дата обращения: 10.10.2025).
4. Сайт ФГУП «Росморпорт» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rosmorport.ru/news/photoarchive/company/35290/> (дата обращения 10.11.2025).
5. Технические характеристики паромов // Korabel.ru: отраслевой портал. – URL: <https://www.korabel.ru/fleet/info/80693.html> (дата обращения: 10.10.2025).
6. PALUBA.MEDIA: морской медиапортал [Электронный ресурс]. – URL: <https://paluba.media/news/14381> (дата обращения: 10.10.2025).
7. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 года (с изменениями на 26.09.1997 г.) (MARPOL 73/78). Приложение VI. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/499014496/titles/6540IN> (дата обращения: 11.10.2025).
8. MO Marine Engine Regulations [Электронный ресурс] // DieselNet: Emission Standards. – URL: <https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php> (дата обращения 10.10.2025).
9. Двухтопливные двигатели WÄRTSILÄ 34DF проектное руководство. – URL: https://tech-expo.ru/upload/iblock/8a2/Instruktsiya-po-ekspluatatsii-W_rtsil_-W34DF.pdf (accessed: October 10, 2025).
10. Сайт ООО «Liotec»: блог о дизельном топливе и присадках. – URL: <https://liotec.ru/blog/sostav-dizelnogo-topliva-himicheskiy-frakcionnyy/> (дата обращения 10.10.2025).

References

1. Govorukhin V.P., Tarantsev A.A., Rodionov V.A., & Korolev O.A. (2025). Use of Alternative Fuels to Ensure Environmental Safety of Marine Vessels. *Marine Intelligent Technologies**, 1(1(67)), 75–81.
2. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships: In 18 Parts. Part 3. Machinery, Equipment and Supplies. (2015). Russian Maritime Register of Shipping (RMRS). St. Petersburg: RMRS. 188 p.
3. Official Website of the Ministry of Transport of the Russian Federation. – URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11489> (accessed: October 10, 2025).
4. FSUE "Rosmorport" Official Website. – URL: <https://www.rosmorport.ru/news/photoarchive/company/35290/> (accessed: November 10, 2025).
5. Technical Specifications of Ferries. Korabel.ru: Industry Portal. – URL: <https://www.korabel.ru/fleet/info/80693.html> (accessed: October 10, 2025).
6. PALUBA.MEDIA: Maritime Media Portal. – URL: <https://paluba.media/news/14381> (accessed: October 10, 2025).
7. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 (MARPOL 73/78), Annex VI – Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships (as amended on September 26, 1997). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/499014496/titles/6540IN> (accessed: October 11, 2025).
8. IMO Marine Engine Regulations. DieselNet: Emission Standards. – URL: <https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php> (accessed: October 10, 2025).
9. Wärtsilä 34DF Dual-Fuel Engine Design Guide. – URL: https://tech-expo.ru/upload/iblock/8a2/Instruktsiya-po-ekspluatatsii-W_rtsil_-W34DF.pdf (accessed: October 10, 2025).
10. Liotec LLC: Blog on Diesel Fuel and Additives. – URL: <https://liotec.ru/blog/sostav-dizelnogo-topliva-himicheskiy-frakcionnyy/> (accessed: October 10, 2025).

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

Говорухин Валерий Павлович, кандидат технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; e-mail: vgovoruhin@iptran.ru

Соколов Юрий Петрович, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт синтетического каучука имени академика С.В. Лебедева», 198035 Россия, Санкт-Петербург, ул. Гапсальская д. 1, e-mail: ypsokolov@mail.ru.

Ильина Наталья Николаевна, научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13.; e-mail: innmail@mail.ru

Быстрова Наталия Юрьевна научный сотрудник, Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук, 199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб. 5, ecol@spbrc.nw.ru

Valery P. Govorukhin, professor, PhD (Eng.), deputy director for research, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th Line VO, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: vgovoruhin@iptran.ru

Yury P. Sokolov, PhD (Chem), leading researcher, S.V. Lebedev Synthetic Rubber Research Institute, 1 Gapsalskaya str., St.-Petersburg, 198035 Russian Federation. e-mail: ypsokolov@mail.ru.

Nataliya N. Ilina, researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th Line VO, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: innmail@mail.ru

Nataliya Yu. Bystrova, researcher, Saint Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Universitetskaya nab., 5, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation; ecol@spbrc.nw.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.01.2026.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 26.01.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 01.02.2026.

Научная статья

УДК 621.125

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.013>

Моделирование структурно-функциональных аспектов цифровой эксплуатации судовых движительно-рулевых комплексов Azipod с использованием технологий Big Data

Герасиди В.В.¹gerasidi@rambler.ru¹Государственный морской университет имени Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В работе представлена архитектура и структурно-функциональная модель диагностической платформы с использованием технологий больших данных Big Data для современных движительно-рулевых комплексов Azipod® фирмы ABB, установленных на морском судне-снабженце. Ключевым трендом в развитии диагностики судовых энергетических установок является их глубокая цифровизация, основанная на интеграции больших данных, интернета вещей, машинного обучения и цифровых двойников, которая формирует принципиально новую концепцию технической эксплуатации. Целью работы является расширение методологических основ диагностики судовых энергетических установок путем обнаружения новых паттернов (в том числе значимых параметров) и формирования правил их интерпретации с применением методов цифровой обработки экспериментальных данных. В работе использовались методы ETL-обработки потоков данных, основанные на принципах Big Data и обеспечивающие высокоскоростной доступ к информации для аналитики и визуализации благодаря этапам очистки, преобразования и обогащения данных с системы мониторинга судовых движительно-рулевых комплексов Azipod®V. На основе анализа элементов и функций исследуемой системы мониторинга представлена возможная архитектура и функциональная модель Big Data, реализованная по принципу «Data Lake» (озеро данных). Их взаимосвязь подобна замкнутому водному циклу в природной экосистеме. В качестве примера в работе представлен блок обработки («умная витрина»), осуществляющий классификацию режимов работы судовых движительно-рулевых комплексов Azipod®V. Классификация выполняется на основе расчёта нового для диагностической практики синтетического параметра локальной внутренней размерности («LOAD INDEX Digital», LID). Этот параметр позволяет идентифицировать различные режимы работы, включая эксплуатацию в ледовых условиях, в рамках обширной и неоднородной выборки данных. Формируемые критерии оценки объектов исследования позволят определить уровень технологического развития элементов СЭУ, необходимый для проектирования и строительства новых судов, а также заложить основу для обновления регламентов и методик освидетельствования, применяемых Морским регистром судоходства РФ. Разрабатываемая диагностическая платформа в рамках цифровой трансформации технической эксплуатации СЭУ представляет собой важный фундамент и практический инструмент для перехода от традиционного судоходства к интеллектуальному и автономному морскому транспорту.

Ключевые слова: судовой движитель, анализ, цифровые технологии, техническое состояние, диагностическая система.

Благодарности: автор выражает благодарность судовладельцам (операторам) фирм движителей, установленных на морских судах снабженцев за предоставление возможности проведения исследований.

Для цитирования: Герасиди В.В. Моделирование структурно-функциональных аспектов цифровой эксплуатации судовых движительно-рулевых комплексов Azipod с использованием технологий Big Data, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 120—132. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.013.

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.013>

Modeling the structural and functional aspects of digital operation of Azipod marine propulsion and steering systems using Big Data technologies

Viktor V. Gerasidi¹gerasidi@rambler.ru¹Admiral Ushakov State Maritime University, Russian Federation

Abstract. This paper presents methodological aspects of creating a diagnostic platform for the digital transformation of the technical operation of marine propulsion systems, using the example of Azipod® V propulsion and steering systems. The development of diagnostic systems for marine propulsion systems is constantly evolving. Currently, intelligent and digital technologies are being used to improve the analysis of the current technical condition, as well as the detection and prediction of malfunctions in marine propulsion systems during operation. The aim of this paper is to expand the methodological foundations of technical diagnostics for marine propulsion and steering systems, based on modern intelligent data processing technologies, including machine learning methods, digital twins, and approaches to managing the lifecycle of machine learning models. The paper utilizes statistical processing and comparative analysis of data from the monitoring system for Azipod® V propulsion and steering systems. The developed criteria for evaluating research objects will help determine the level of technological development of propulsion plant components required for the design and construction of new vessels, as well as lay the foundation for updating the regulations and inspection methods used by the Russian Maritime Register of Shipping. The diagnostic platform being developed as

part of the digital transformation of propulsion plant technical operation represents an important foundation and practical tool for the transition from traditional shipping to intelligent and autonomous maritime transport.

Keywords: marine propulsion system, analysis, digital technologies, technical condition, diagnostic system.

Acknowledgments: The author expresses his gratitude to the shipowners (operators) of propulsion companies installed on supply ships for providing the opportunity to conduct research.

For citation: Viktor V. Gerasidi "Modeling the structural and functional aspects of digital operation of Azipod® marine propulsion and steering systems using Big Data technologies", Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 120—132. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.013.

Введение

Современная судостроительная отрасль переживает этап глубокой цифровой трансформации, обусловленной стремительным развитием технологий Интернета Вещей (IoT), промышленной аналитики и искусственного интеллекта [1-5].

В настоящее время судовые энергетические установки (СЭУ) оснащаются современными SCADA-системами (Supervisory Control And Data Acquisition) оснащенными датчиками, которые в режиме реального времени передают теплофизические (теплотехнические), вибрационные, трибологические параметры для дальнейшей обработки. Накопление таких значительных объемов информации закономерно приводит к необходимости разработки и внедрения оптимизированных баз больших данных (Big Data), предназначенных для выполнения глубокой аналитики.

Эволюция SCADA-систем СЭУ тесно связана с развитием судостроения, микроэлектроники и вычислительной техники (рисунок 1). Из рисунка 1 видно, что эволюцию развития систем управления и автоматизации в судостроении и судоходстве с 1960-х по 2020-е годы, от простых аналоговых систем до интеллектуальных, интегрированных и автономных решений на базе искусственного интеллекта [2-5].

Максимальная оптимизация, минимальные простои. Эксплуатация становится наукоемкой, основанной на данных, а не только на опыте.

Развитие судовых систем управления отражает общую тенденцию цифровой трансформации: от механической и электронной автоматизации к интеллектуальным, сетевым и автономным системам. Это позволяет не только повысить безопасность и эффективность морских операций, но и переосмыслить саму концепцию управления судами в XXI веке от человека-оператора к человеку-наблюдателю или даже к полностью автономному управлению [3-6].

Судовые SCADA-системы (системы диспетчерского контроля и сбора данных) и интегрированные платформы управления (например, «Intelligent Asset» от «Wärtsilä» или «Ability™ Marine» от «ABB») в режиме реального времени собирают данные с датчиков и оборудования СЭУ. Эти данные шифруются (для обеспечения кибербезопасности и защиты коммерческой тайны) и передаются через спутниковую связь или другие каналы в удаленные диагностические центры «Remote Monitoring Centers» (RMC), расположенные на берегу.

В диагностических центрах данные анализируются с использованием алгоритмов искусственного интеллекта (AI), машинного обучения (ML) и цифровых двойников. Это позволяет сократить эксплуатационные расходы за счёт

предотвращения незапланированных ремонтов и простоев оборудования, снижения расхода топлива при неоптимальных режимах работы, а также, за счёт, внедрения моделей прогнозирования отказов элементов СЭУ.

В настоящее время ведущие производители судового энергетического оборудования активно применяют цифровые технологии для мониторинга и технической эксплуатации СЭУ. Однако собранные данные, как правило, не публикуются и не передаются в открытый доступ, поскольку составляют коммерческую тайну компаний. В этих условиях разработка собственных цифровых решений становится важной научно-технической задачей. Ключевым этапом в этом направлении является разработка архитектуры, функциональной модели, основанной на принципах работы с большими данными, является фундаментом для проведения независимых исследований и разработки отечественных систем прогнозирования, диагностики и оптимизации работы СЭУ. Таким образом, формирование структурно-функциональной модели диагностической платформы СЭУ представляет собой актуальную и стратегически значимую задачу.

1970	1980	1990	2000	2010	2020
Аналоговые системы и локальный контроль	Появление цифровых контроллеров	Интегрированные судовые SCADA-системы	Интеграция с береговыми центрами и развитие телеметрии	Эра Больших Данных, ИИ	
Релейно-лестничная автоматика	Цифровые программируемые контроллеры	Стандартизация сетевых протоколов (например, Modbus)	Спутниковая связь, облачные вычисления и кибербезопасность	Машинное обучение (ML), Цифровые двойники (Digital Twins)	
Локальное управление СЭУ	Автоматизированные системы управления СЭУ	Централизованное управление SCADA-систем	Оснащение шлюзов передачи данных SCADA-систем	SCADA-системы источниками данных для сложных аналитических платформ	
Отсутствие централизованной системы сбора данных	Первые дисплеи, отображения мнемостем	Создание баз данных параметров СЭУ, выявление тенденций	Передача параметров СЭУ в береговые диагностические центры производителей	Виртуальные модели, обучение AI-моделей	
Опытно-практический метод принятия решений персоналом	Автоматизация рутинных операций, повышение точности контроля	Начало дистанционного контроля с берега	Анализ данных береговыми центрами диагностики	Эксплуатация становится наукоемкой	

Рис. 1. Основные этапы развития SCADA-систем СЭУ [1-5]

Объектом экспериментального исследования являются комплексные диагностические платформы, основанные на интеграции судовых SCADA-систем с интеллектуальными облачными платформами производителей для повышения эффективности эксплуатации СЭУ.

Функциональный цикл данных в таких платформах включает: сбор "сырых" данных с SCADA-систем СЭУ, их последующую обработку, организацию и загрузку в специализированные хранилища (витрины данных) облачной базы, где данные становятся основой для углубленного анализа с применением технологий искусственного интеллекта.

Элементами SCADA-систем являются: датчики и исполнительные механизмы; программируемые логические контроллеры и удаленные терминальные блоки; рабочие станции операторов; система тревог

и событий; программный интерфейс для визуализации, хранения и управления процессом эксплуатации СЭУ.

Ключевыми элементами систем управления и контроля процессом эксплуатации СЭУ являются датчики (сенсоры) и контролеры, функцией которых является преобразование физических величин эксплуатационных теплофизических, вибрационных, трибологических параметров электрические сигналы, а затем в оцифрованные данные. Таким образом, системы управления и контроля процесса эксплуатации СЭУ основаны на безразборных (неразрушающих) методах диагностики, достоверность результатов которых необходимо повышать. В связи с этим расширение методологических основ технической диагностики по теплотехническим, вибрационным и трибологическим параметрам является актуальной задачей.

В настоящее время существуют комплексные диагностические платформы производителей СЭУ, таких фирм как, «Wartsila», «MAN», «Caterpillar», «ABB» и т.д. Ключевое направление этих платформ является развитие СЭУ, которое является основным в концепции "Судна 4.0" и "Цифрового двойника" (таблица 1).

«Wärtsilä Expert Insight» – это облачная платформа предиктивной аналитики, которая превращает данные с оборудования в прогнозы и рекомендации. Система предсказывает поломки (форсунки, турбокомпрессоры), рекомендует оптимальное время для обслуживания и помогает снизить расход топлива. Это переход от реагирования на поломки к управлению по состоянию.

«MAN CEON» – это единая облачная IoT-платформа для мониторинга и анализа работы двигателей и оборудования фирмы «MAN» в реальном времени. Система прогнозирует износ

критических компонентов (поршневых колец, форсунок), рекомендует оптимальные режимы работы для снижения расхода топлива и предотвращает внезапные остановки, переводя обслуживание на прогнозную основу.

«Cat® Product Link» и платформа аналитики. Система предоставляет данные о местоположении, расходе топлива, рабочих часах и производительности. Это позволяет выявлять неоптимальные режимы работы, планировать техобслуживание по фактическому состоянию узлов двигателя.

«ABB Ability™» интегрированная цифровая платформа для управления и оптимизации всей судовой энергетической системы и электродвижения.

Из таблицы 1 видно, что технологическим ядром цифровых технологий, применяющихся производителями в диагностических платформах являются ключевые цифровые технологии:

1. Облако и IoT – сбор данных с удалённый централизованный сбор и обработка данных с датчиков оборудования в постоянном режиме.
2. Искусственный интеллект и машинное обучение (AI/ML) – автоматическое выявление аномалий и прогнозирование отказов.
3. Цифровые двойники – виртуальные модели оборудования, которые точно имитируют поведение реальных компонентов.
4. Большие данные – комплексный анализ всей исторической и текущей информации.
5. Предиктивная аналитика на основе моделей – сравнение реальных данных с цифровыми моделями идеальной работы для точного прогноза остаточного ресурса деталей.
6. Мониторинг в реальном времени – отслеживание ключевых параметров (температуры, давления, вибрации) для оценки текущего состояния.

Таблица 1.

Сравнительная таблица цифровых технологий диагностических платформ ведущих производителей СЭУ [7-11]

№	Название фирмы и платформы	Применяемые цифровые технологии	Результат
1	Wärtsilä Wärtsilä Expert Insight [7]	облачные вычисления и IoT-платформа «ML» «Digital Twins» «Big Data»	– прогнозирование отказов (поршневой группы, топливной аппаратуры, турбокомпрессора) – переход к предиктивному обслуживанию – снижение эксплуатационных затрат – оптимизация расхода топлива и выбросов
2	MAN Energy Solutions MAN CEON [8]	–облачные вычисления и IoT-платформа «Big Data» «Smart Maintenance» «Real-time condition monitoring»	–прогнозирование остаточного ресурса деталей (поршневые кольца, форсунки и т.д.) – оптимизация работы двигателя – повышение доступности флота (снижение простоев) –снижение рисков и соблюдение экологических норм
3	Caterpillar (MaK / Cat) Cat® Product Link & Analytics [9]	«Remote monitoring» – телематика и облачная аналитика – статистический анализ и выявление аномалий в работе	Диагностика неисправностей, оптимизация графиков технического обслуживания, снижение времени простоя. Сервисные инженеры могут дистанционно давать рекомендации экипажу
4	ABB ABB Ability™ для морского флота [10]	Интегрирование данных (data integration / data fusion)	Оптимизация всей энергосистемы судна, прогнозирование отказов главных элементов винторулевых комплексов, мониторинг состояния аккумуляторных батарей на гибридных судах, повышение энергоэффективности

Примечание

ML (Machine Learning) – машинное обучение, это область искусственного интеллекта, в которой компьютер запрограммирован различными закономерностями для принятия решения;

«Digital Twin» (цифровой двойник) – это виртуальная цифровая копия физического объекта, системы или процесса, которая постоянно синхронизируется с ним через обмен данными в реальном времени;

«Smart Maintenance» («умное обслуживание») – это подход к технической эксплуатации, основанный на анализе данных в реальном времени, машинном обучении и цифровых технологиях («IoT», «Digital Twin», «Big Data»);

«Real-time condition monitoring» – это непрерывный сбор и анализ данных о работе оборудования (например, двигателя) сразу после их поступления, чтобы оперативно выявлять отклонения, неисправности или признаки износа;

«Remote monitoring» — это наблюдение за оборудованием или процессами на расстоянии, с помощью датчиков, связи и цифровых систем.

Цель производителей заключается, во-первых, в продаже самого оборудования, а во-вторых, в продаже сервисных услуг, основанных на анализе данных с диагностических платформ. В конечном счёте, это создаёт долгосрочную зависимость потребителей от производителя. Эти платформы создают для производителей постоянный поток доходов от подписок на программное обеспечение (ПО) и сервисы, одновременно "привязывая" клиента к своей экосистеме. Однако для двигателей и движителей с определёнными серийными номерами, установленных на судах под флагом Российской Федерации или эксплуатируемых на её территории, получение диагностической информации от производителя невозможно. Таким образом, развития систем контроля и диагностики судовых

двигателей и движителей является актуальной научно-технической задачей, направленной на решение стратегических проблем народного хозяйства в морской отрасли Российской Федерации. Реализация подобных инициатив вносит значительный вклад в обеспечение технологической безопасности страны.

Методика экспериментального исследования

Анализ литературных источников в области внедрения современных цифровых технологий в процесс технической эксплуатации СЭУ показывает, что все научные труды направлены на развитие концепции «цифровой эксплуатации» СЭУ (таблица 2).

Таблица 2.

Экспериментальные исследования «Цифровой эксплуатации» СЭУ[11-17]

№	Название научной статьи	Цифровая Технология	Ключевые Методы	Цели и задачи исследования / Достигнутые результаты
1	Метод прогнозирования остаточного срока службы судовых дизельных двигателей, основанный на глубоком обучении [11]	«Predictive analytics»	«LSTM» «CNN» «Random Forest»	Цель: повысить точность прогнозирования остаточного ресурса (RUL) судовых двигателей. Задачи: 1) Преодолеть ограничения традиционных статистических методов; 2) Учесть временные зависимости в данных датчиков. Разработанная гибридная модель CNN-LSTM показала превосходную точность по сравнению с базовыми моделями. Обеспечено раннее предупреждение об износе критических компонентов (поршневые кольца, форсунки) судовых двигателей
2	Глобальная двухпроцессорная структура для диагностики неисправностей и удаленного мониторинга судовых энергетических систем [12]	«Digital Twin»	«PMM» «ML» «Data Fusion»	Цель: создать комплексный «framework» для дистанционной диагностики сложных неисправностей. Задачи: 1) Интегрировать физические модели с данными IoT; 2) Обеспечить точную идентификацию взаимосвязанных дефектов. Предложенный framework успешно выявляет и классифицирует сложные, взаимосвязанные неисправности, обеспечивая упреждающий мониторинг и снижая риск внезапных отказов судовых двигателей
3	Неконтролируемое обнаружение аномалий в данных датчиков судовых двигателей с использованием вариационных автоэнкодеров [13]	«IoT» Большие данные (Big Data)	Распределенные вычисления «Data Streaming» Обнаружение аномалий «VAE»	Цель: обнаруживать аномалии в работе двигателя без размеченных данных об отказах ("обучение без учителя") Задачи: 1) Научить модель "нормальному" поведению; 2) Выявлять незаметные, развивающиеся аномалии. Метод VAE продемонстрировал высокую чувствительность к развивающимся аномалиям, обеспечивая более раннее предупреждение, чем традиционные пороговые методы для прогнозирования неисправностей элементов судовых двигателей
4	Метод мониторинга состояния и диагностики неисправностей судовых турбокомпрессоров на основе сверточной нейронной сети и машины опорных векторов [14]	Машинное обучение / Глубокое обучение	«CNN» «SVM» «VAE»	Цель: Разработать точный метод диагностики неисправностей турбокомпрессора. Задачи: 1) Автоматически извлекать признаки из вибросигналов; 2) Надежно классифицировать тип дефекта (дисбаланс, загрязнение). Гибридный метод CNN-SVM достиг высокой точности классификации различных неисправностей, доказав эффективность автоматического извлечения признаков для диагностики судовых турбокомпрессоров

4	Структура планирования прогностического технического обслуживания морских судов с использованием цифрового двойника и глубокого обучения с подкреплением [15]	Оптимизация и принятие решений	«DRL»	Цель: оптимизировать график технического обслуживания всего флота. Задачи: 1) Учесть состояние каждого судна, логистику и доступность доков; 2) Максимизировать общую доступность флота. Модель DRL выработала стратегии планирования, которые превосходят традиционные подходы, демонстрируя значительное снижение затрат и простоев на уровне флота.
5	Комплексный метод мониторинга состояния судовых двигателей на основе анализа смазочного масла и объединения эксплуатационных данных [16]	Комплексный анализ данных	«Data Fusion»	Цель: повысить точность диагностики износа двигателя. Задачи: 1) Интегрировать данные хим. анализа масла с операционными параметрами; 2) Определить не только факт, но и причину износа. Интегрированный подход позволил точно идентифицировать источник и механизм износа, обеспечивая целевые рекомендации по обслуживанию.
	От хранилища данных к озеру данных: переосмысление роли архитектуры данных в современных организациях [17]	Архитектура Больших Данных и Data Ops	«Data Lake» «Data Warehouse», «Data Marts»	Цель: сравнение архитектур данных, переход от классических хранилищ к гибридным моделям с Data Lake и Data Marts. Задачи: 1) Реализовать переход от хранилища данных к озеру данных; 2) Переосмысление роли архитектуры Больших Данных и Data Ops/

Примечание

Predictive Analytics (предиктивная аналитика) – это область анализа данных, которая использует статистические алгоритмы и методы машинного обучения для прогнозирования будущих событий на основе исторических данных;

LSTM (Long Short-Term Memory) долгая краткосрочная память, это особый тип нейронной сети, который используется в глубоком обучении для работы с последовательностями данных;

CNN (Convolutional Neural Network) – сверточная нейронная сеть, это тип искусственной нейронной сети, предназначена для обработки визуальных данных;

Random Forest (случайный лес) — это алгоритм машинного обучения, который строит множество деревьев решений и объединяет их результаты для получения более точного и стабильного прогноза;

PMM (Physics-Based Mathematical Models) – это модели, построенные на физических законах, а не на статистике или данных.

Data Fusion (слияние данных или интеграция данных) это процесс объединения информации из нескольких источников;

Фреймворк (framework) это готовая структура для разработки программного обеспечения или решение определённых задач;

«Data streaming» — непрерывная передача и обработка данных в реальном времени.

VAE (Variational Autoencoders) –вариационные автоэнкодеры, это нейросетевая модель, которая учится сжимать данные в компактное "скрытое" представление и воссоздавать их, при этом моделируя вероятностное распределение нормальных данных;

SVM (Support Vector Machine)– метод опорных векторов, это алгоритм машинного обучения, предназначенный для классификационного и регрессионного анализа данных;

DRL (Deep Reinforcement Learning)– глубокое обучение искусственного интеллекта сложных данных, например, изображения, сигналы;

Data Fusion (слияние данных) – это процесс объединения информации из разных источников, чтобы получить более точное, надёжное и полное представление о состоянии системы;

Data Lake (озеро данных) это большое хранилище неструктурированных данных, без предварительной обработки;

Data Warehouse (хранилище данных) это структурированное хранилище готов к анализу данных.

Data Marts (витрины данных) – это специализированные подмножества хранилища данных, ориентированные на конкретную задачу или предметную область;

«DataOps» — это методология управления данными, направленная на ускорение и повышение качества разработки и эксплуатации конвейеров данных.

В научной работе [11] рассматриваются подходы к прогнозированию остаточного ресурса узлов судовых двигателей на основе современных методов машинного обучения, включая «LSTM», «CNN» и «Random Forest», как составляющих цифровой эксплуатации.

В научной работе [12] выполнены исследования по созданию глобальной двухпроцессорной структуры для диагностики неисправностей и удалённого мониторинга судовых энергетических установок с использованием технологий «Digital Twin», «PMM», «ML» и «Data Fusion». Разработанный «framework» обеспечивает интеграцию физико-математических моделей с данными «IoT», что

позволяет точно выявлять и классифицировать сложные взаимосвязанные неисправности, снижая риск внезапных отказов.

В работах [13,16] проведены исследования, направленные на выявление скрытых дефектов в элементах судовых энергетических установок с использованием методов, не требующих предварительной разметки данных об отказах. Работа [13] основана на анализе сигнальных данных (вибрация, температура) с применением вариационных автоэнкодеров (VAE), что позволяет моделировать нормальное поведение системы и выявлять отклонения как признаки развивающихся аномалий. В свою очередь, работа [16] реализует

мультимодальный подход, интегрируя результаты химического анализа смазочного масла с эксплуатационными параметрами двигателя посредством технологии слияния данных (Data Fusion).

В работах [12,15] реализованы передовые архитектуры, основанные на концепции цифрового двойника. В работе [12] основное внимание уделено диагностике сложных и взаимосвязанных неисправностей за счёт интеграции физико-математических моделей (PMM) с данными датчиков «IoT» и методами машинного обучения, что обеспечивает глубокий анализ состояния отдельных энергетических установок. В работе [15] выполнены исследования направлены на стратегическое управление технической эксплуатацией на уровне флота, предлагая подход к оптимизации графиков прогнозического обслуживания с использованием глубокого обучения с подкреплением (DRL).

Анализ современных научных работ показывает переход от традиционной технической эксплуатации СЭУ к цифровой, основанной на интеграции физико-математических моделей, машинного обучения и архитектур больших данных, что обеспечивает сквозную диагностику, прогнозирование отказов и оптимизацию обслуживания на уровне судна и флота.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью расширения действующих методов технической диагностики СЭУ, за счёт интеграции современных цифровых технологий, таких как, машинное обучение, цифровые двойники и анализ больших данных, что позволяет повысить точность, глубину и оперативность диагностики в условиях эксплуатации морских судов. В условиях ужесточения требований к надёжности, безопасности и экономической эффективности морского транспорта, а также повсеместного распространения SCADA-систем СЭУ, традиционные методы технической диагностики демонстрируют всё более очевидные ограничения. Эти методы, основанные на периодических осмотрах, пороговых критериях и статистических моделях, не способны в полной мере учитывать динамику эксплуатационных нагрузок, выявлять скрытые и взаимосвязанные дефекты на ранних стадиях развития, а также адаптироваться к разнородным и непрерывно поступающим данным с многочисленных датчиков.

Цифровые технологии – это не смена парадигмы, а эволюция инструментария, который позволяет применять классические принципы с невиданной ранее скоростью, точностью и масштабом [18-25].

Таким образом, расширение действующих методов диагностики СЭУ за счёт цифровых технологий представляет собой не просто техническое усовершенствование, а стратегическое направление цифровой трансформации морской отрасли, соответствующее глобальным трендам IMO, классификационных обществ и индустрии 4.0, что обуславливает высокую научную и практическую актуальность настоящего исследования.

Целью исследования является приведение примеров использования некоторых цифровых технологий на основе данных SCADA-системы контроля и диагностики движительно-рулевых комплексов Azipod® фирмы ABB, установленных на

морском судне-снабженце дедвейтом более 5000 тонн (рисунок 2). На рисунке 2 видно, что в данную SCADA-систему встроены модуль «ProCheck» фирмы FAG, предназначенный для комплексной удалённой диагностики и локального контроля технического состояния подшипников судового движителя.

В рассматриваемой системе SCADA реализована через интегрированную систему автоматизации судна (IAS — Integrated Automation System), которая включает в себя следующие ключевые компоненты:

- блок интерфейса Azipod(AIU) является основной интерфейсный блок, собирающий данные с датчиков Azipod и передающий их в IAS и PCU (блок управления силовой установкой).

- программируемый логический контроллер (ПЛК) управляет логикой работы систем (например, гидравлической системы рулевого привода).

- система управления силовой установкой (PCU / PCS) получает данные от AIU и управляет работой подруливающего устройства.

- блок аварийной сигнализации (SAU) удалённый модуль ввода-вывода AIU, обрабатывающий аварийные сигналы.

- блок измерения Azipod (ZMU) предназначен для измерения вибрации, температуры и других параметров внутри Azipod.

Сетевая архитектура Modbus TCP/IP системы SCADA реализована для передачи данных вибрационного мониторинга системы ProCheck, а также для обмена управляющими и измерительными сигналами между AIU, IAS, PCU и мостиком.

Modbus TCP/IP имеет две независимые резервные линии передачи данных для повышения надёжности SCADA-систем движителя движительно-рулевых комплексов системы AZIPOD фирмы "ABB".

В измерительный блок системы ProCheck входят два модуля cRIO-9234, который принимает сигналы от датчиков вибрации и cRIO-9201 частоту вращения и угла поворота судового движителя (рисунок 2б). Из рисунка 2б видно, что на каждом подшипнике установлены по два датчика вибрации в различных направлениях. Измерительный блок системы ProCheck выполняет следующие функции (рисунок 2б):

- собирает данные со всех датчиков (сырые данные);

- калибрует полученные сырые данные от датчиков и преобразует сигналы вибрации из временной области в частотную при помощи БПФ анализа;

- рассчитывает контролируемые значения общей вибрации СКЗ в диапазоне 0.3 Гц – 200 Гц.

- выполняет сравнение значений СКЗ с установленными пороговыми;

- отображает информацию текущих значений СКЗ на мнемосхемах и графиках в реальном времени в центральном посту управления (ЦПУ) «Operator Panel».

- упаковывает сырых данных в зашифрованные бинарные файлы (bin) и отправляет на сервер производителя при помощи «RDS Server» (рисунок 2в).

Таким образом, система «ProCheck» не предназначена для долговременного хранения больших объемов данных и не выполняет углубленной диагностики элементов судовых

двигателей. Ее ключевой задачей является оперативный мониторинг и передача данных.

Проведение глубокого анализа вибрации, включая построение исторических трендов и детальную диагностику состояния подшипников судового двигателя, возможно только с использованием специализированной диагностической платформы производителя. При этом алгоритмы и методы, используемые производителем для диагностики, являются коммерческой тайной и не раскрываются конечным пользователям.

В связи с этим исследование, направленное на разработку методических аспектов структурно-функциональной модели комплексной диагностической платформы судовых двигателей на примере существующего судна-снабженца, оснащенного современной SCADA-системой, которая полностью подходит для применения и внедрения концепции «цифровой эксплуатации» судового двигателя, является актуальной задачей.

Экспериментальное исследование

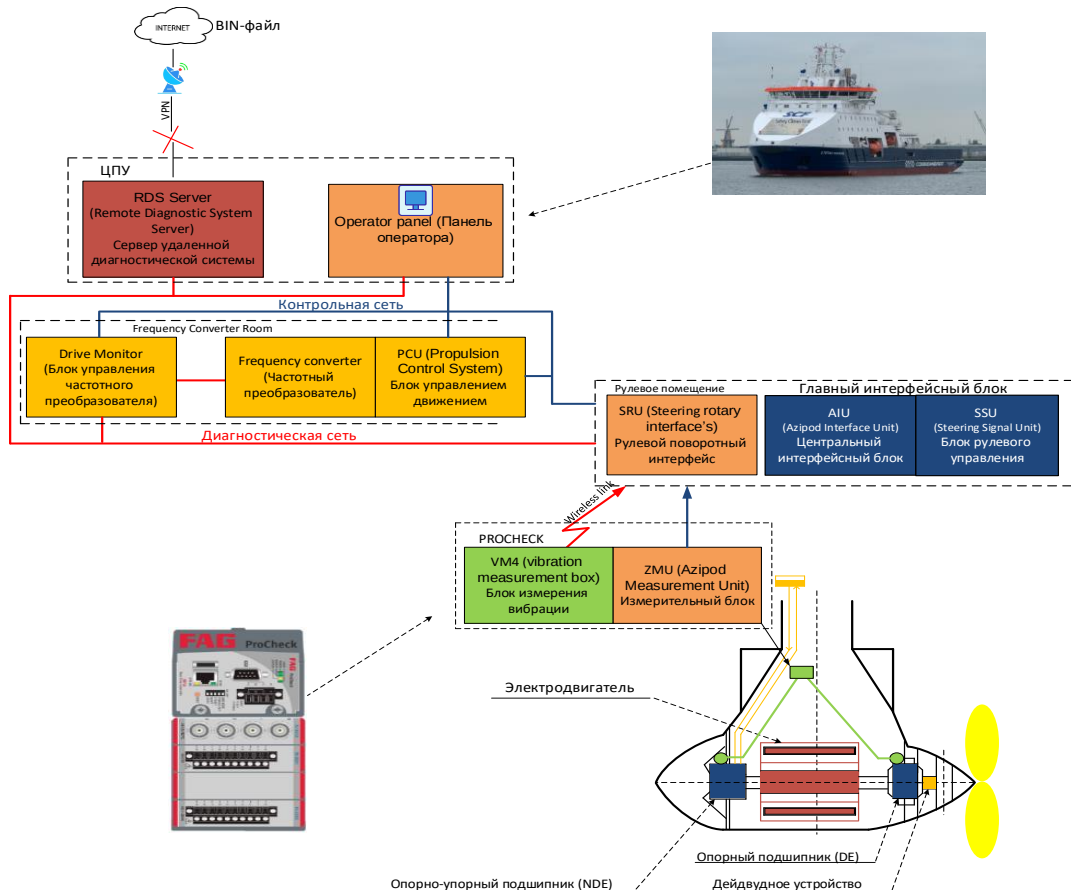
Целью работы является расширение методологических основ диагностики судовых энергетических установок путем обнаружения новых паттернов (в том числе значимых параметров) и формирования правил их интерпретации с применением методов цифровой обработки экспериментальных данных.

За прототип можно взять описанную ранее систему «ProCheck», которая предназначена для

оперативного контроля и мониторинга параметров в реальном времени. Заложенные в систему алгоритмы и функции обеспечивают общую оценку технического состояния механизма. При этом существующие модули системы и выходные данные позволяют расширить возможности технической диагностики. На базе штатной системы можно создать дополнительный инструментарий для углубленного анализа, что позволяет внедрить концепцию «цифровой эксплуатации» судового двигателя.

Концепция цифровой эксплуатации судовой энергетической установки (СЭУ) невозможна без определения и интеграции ключевых параметров, на которых базируется архитектура больших данных (Big Data). Только применение технологий ETL (Extract, Transform, Load), обеспечивающих извлечение, преобразование и загрузку данных в форматы, оптимизированные для высокоскоростной обработки и эффективного хранения больших объемов информации, позволяет реализовать современные цифровые методы анализа данных, необходимые для мониторинга, диагностики и прогнозирования состояния СЭУ.

Для решения задачи расширения функций вибродиагностики, таких как углубленный спектральный анализ, мониторинг долгосрочных трендов и применение алгоритмов машинного обучения, требуется переход на платформу Big Data с использованием данных, накопленных в системе «ProCheck».



б)



в)

BIN-файл

- device_path.xml (название судна)
- procheck_device.xml (указания борта судна, настроек диапазона измерительных частот)
- procheck_device_cfg.xml (точки измерения вибрации)
- procheck_monitoring_cfg.xml (калибровка, расчет, параметры частоты вращения и угла поворота)
- procheck_data_signal_timestamp.bin (сырые временные сигналы датчиков вибрации)

Рис. 2. Принципиальная схема всего цикла обработки измерительных данных движительно-рулевых комплексов системы Azipod® фирмы "ABB"

а) элементы системы управления и контроля; б) функции измерительного блока; в) структура зашифрованного файла измерительной системы ProCheck

Архитектура базы данных строится по концепции «Big Date» по принципу (Озеро данных) «Data Lake». Функциональная модель «Data Lake» является экосистемой, подобной водному циклу в природе.

Жизненный цикл данных состоит из следующих слоев, которые взаимосвязаны с друг с другом:

1. Горные реки (Источники):

Разнородные потоки данных стекаются в озеро (слой №1: Источники сырых данных «Data Sources»).

2. Озеро (Хранилище):

"Воды" сырых данных накапливаются в едином водоеме (слой №2: Сырые данные «Raw Data»).

3. Фильтрация (Очистка):

Данные естественно "очищаются" и структурируются через процессы «Extract, Transform, Load» (ETL/ELT), слой №3: Очищенные данные «Cleansed data layer».

4. Устья (Потребление):

Кристально чистые данные поступают к аналитическим блокам обработки и приложениям «Data Marts», (слой №4: «Data Marts»).

5. "Питьевые фонтанчики" – интерактивные дашборды (слой №5: Визуализация «framework»).

Источником сырых данных «Data Sources» являются информация, получаемая из SCADA-системы, а именно от системы «ProCheck», которая генерирует зашифрованный файл, структура которого представлена на рисунке 2в. Таким образом, слой «Data Sources» имеет информацию, которая указывает об объекте исследования и данные параметров вибрации, угла и повороте Азипода и их калибровочных коэффициентов. В

связи с этим слой «Raw Data» будет хранить информацию, полученную от системы «ProCheck» в XML и BIN-файлах. Формат файлов для дальнейшей обработки данных является классическими для дальнейшей очистки данных в слое «Cleansed data layer». Данные будут стандартизироваться в единые единицы измерений, обрабатываться, переформатироваться в другие форматы, наиболее совершенствованные для работы в среде «Big Date», которые в настоящее время являются: Parquet - колоночное хранение и JSON - метаданные обработки[26].

На рисунке 3 видно, что архитектура базы данных построена по принципу многослойной модели Big Data. В рамках этой модели данные последовательно проходят этапы очистки, преобразования, обогащения и хранятся в специальных форматах, обеспечивающих их передачу и взаимосвязь через цифровые ETL-процессы (Extract, Transform, Load — Извлечение, Преобразование, Загрузка). Слой источников и сырых данных объединен в папке Raw Data, где хранятся зашифрованные данные, полученные от судовой системы мониторинга «ProCheck». Эти данные, поступающие с регулярной периодичностью, содержат сырые сигналы вибрации и базовые метаданные. После процедуры расшифровки данные распределяются по папкам с временными метками и указанием объектов исследования (правый и левый борт) и конвертируются в структурированные JSON-файлы. На следующем этапе данные очищаются, фильтруются,

обогащаются и перезаписываются в современный колоночный формат Parquet, который обеспечивает высокую скорость обработки большого объема расчетных данных. Соответствующие отфильтрованные метаданные сохраняются в папке metadata.

Слой «Data Marts» включает блоки расчета и обработки данных – так называемые умные витрины, в которых с помощью цифровых технологий выполняется диагностика подшипников движительно-рулевых комплексов Azipod®.

В качестве примера в работе представлен блок обработки («умная витрина»), осуществляющий классификацию режимов работы судовых движительно-рулевых комплексов Azipod®V. Классификация выполняется на основе расчёта нового для диагностической практики синтетического параметра локальной внутренней размерности («LOAD INDEX Digital», LID). Этот параметр позволяет идентифицировать различные режимы работы, включая эксплуатацию в ледовых условиях, в рамках обширной и неоднородной выборки данных.

Определение режимов работы позволит в дальнейшем в других умных витринах выполнять углубленный анализ вибрации подшипниковых узлов объектов исследования в идентичных условиях эксплуатации.

Классификация режимов работы будет фильтроваться с интервалами по частоте вращения ± 10 мин⁻¹ и углу поворота ± 2 В движительно-рулевых комплексов Azipod®.

Однако, даже для такой фильтрации режимов работы значения вибрации могут иметь значительный разброс, поскольку судно может находиться в различных условиях: двигаться по гладкой воде, идти против течения или работать во льдах.

В связи с этим впервые предлагается расчёт нового дополнительного параметра — локальной внутренней размерности («LOAD INDEX Digital», LID). Он характеризует степень однородности и структурной сложности вибрационных процессов для совокупной выборки данных в указанных условиях эксплуатации. Расчет параметра «LID» выполняется на основе нахождения параметров синхронности трёх радиальных датчиков, исключая влияние дефектов подшипников. Осевой датчик исключается из анализа, поскольку его СКЗ преимущественно отражает состояние подшипников, а не изменение внешней нагрузки.

Таким образом, умная витрина «Классификация режимов работы» по результатам расчётов будет определять для каждого режима: общий уровень вибрации, значение LID и процент синхронности.

Пример вывода результата умной витрины «Классификация режимов работы»:

РЕЖИМ: 150-160 об/мин, 0-2 В:

– Класс A1 150-160 0-2 (штатный, характерный)

– доля времени: 85%;

– общий уровень вибрации: 2,1 мм/с;

– средний LID: 3,2

– синхронность: 100 (все датчика в одном классе).

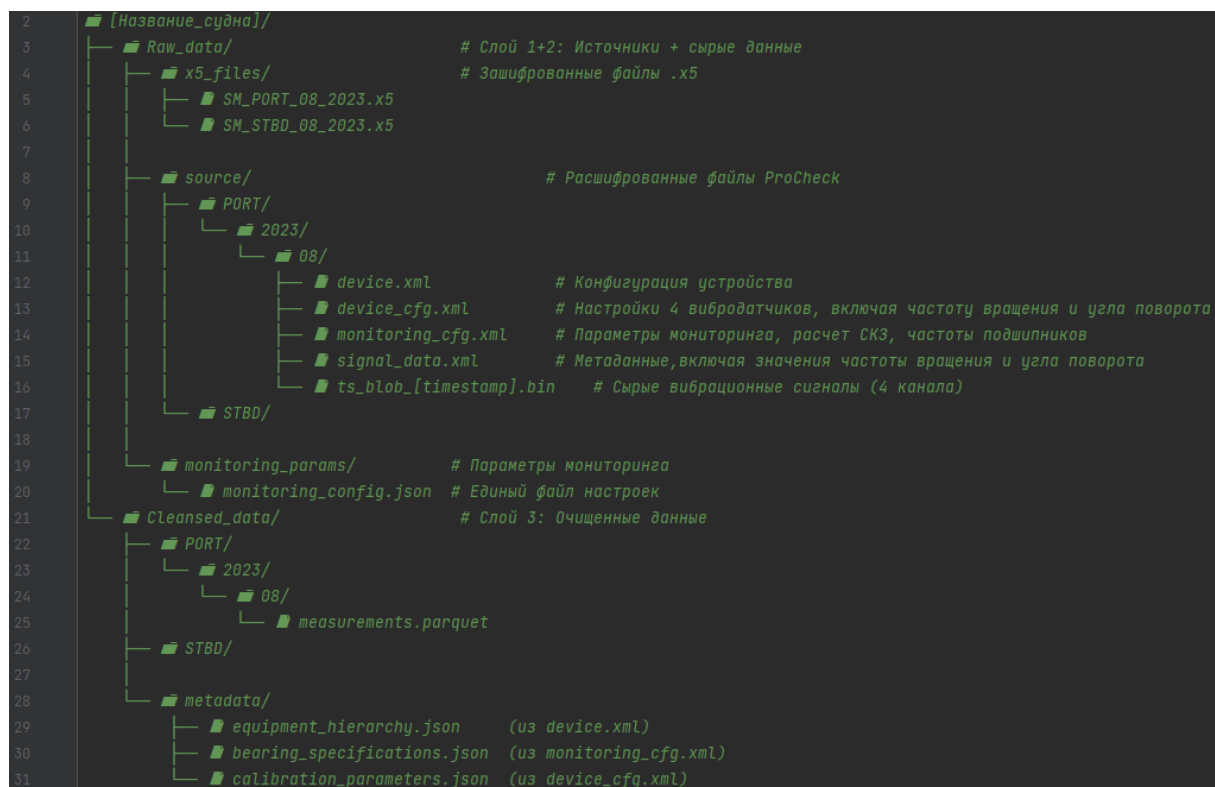


Рис. 3. Принципиальная схема архитектуры базы больших данных «Big Date»

Входными данными блока обработки (умной витрины) являются:

– сигналы виброускорения $a_1(t)$, $a_2(t)$, $a_4(t)$ с трех датчиков, установленных на подшипниковых опорах,

в радиальных направлениях, измеряемых в единицах g ($1g = 10 \text{ м/с}^2$);

– частота вращения вала Азипода $f(t)$, частота импульсов датчика оборотов [Гц];

– угол поворота $U\alpha(t)$, напряжение датчика угла поворота [В].

Расчет параметра LID рассчитывается по формуле:

$$LID(x) = \left(\frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \log \frac{r_j(x)}{r_k(x)} \right)^{-1}$$

где

$r_j(x)$ – расстояние от точки x до j -го ближайшего соседа;

$r_k(x)$ – расстояние до k -го соседа ($k=20$);

k – количество ближайших соседей.

Параметр LID это метрика, оценивающая локальную сложность и плотность выборки данных в пространстве признаков. Для совокупности точек, соответствующих заданным условиям (например, 150–160 мин⁻¹, 0–2 В), LID характеризует однородность и структурную организацию этой выборки. Высокие значения LID (15–50) указывают на разреженную, неоднородную выборку с аномальными или сложноорганизованными данными. Низкие значения LID (2–5) соответствуют плотной, однородной выборке, где точки образуют компактную, хорошо структурированную область.

Медиана LID по кластеру служит агрегатной метрикой, характеризующей типичную структурную сложность выборки данного кластера. Она обеспечивает робастную оценку, устойчивую к единичным выбросам в рамках выборки.

Процентное изменение медианных значений LID (например, увеличение на 25%) позволяет количественно сравнивать центральные тенденции различных выборок (кластеров) и отслеживать динамику изменений условий эксплуатации.

Отдельные выбросы в выборке характеризуются экстремально высокими значениями LID, что отражает их положение в разреженных, неструктурированных областях относительно основной выборки. В предлагаемом подходе такие точки исключаются из анализа при кластеризации методом DBSCAN, что обеспечивает чистоту формируемых классов (выборок) режимов работы [26–28].

Расчет метрика синхронности датчиков рассчитывается по следующим формулам:

$$S_{sync} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \delta(c_1(t), c_2(t), c_3(t))$$

где

$$\delta(c_1, c_2, c_3) = \begin{cases} 1, & \text{если } c_1 = c_2 = c_3 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

где

T – количество временных отсчетов;

$c_1(t)$ – номер кластера (режима работы), к которому относится датчик в момент времени t .

Критерий стабильности режима рассчитывается по формуле:

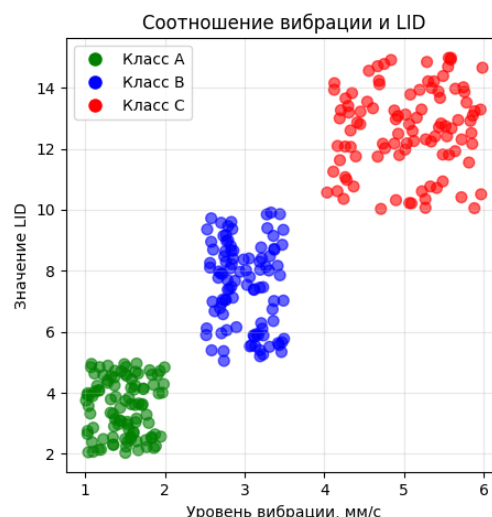
$$S_{stability} = 1 - \frac{\sigma_{LID} \cdot \sigma_{СКЗ}}{\mu_{LID} \cdot \mu_{СКЗ}}$$

где:

μ_{LID} , σ_{LID} – среднее и СКО LID в кластере;

$\mu_{СКЗ}$, $\sigma_{СКЗ}$ – среднее и СКО СКЗ в кластере.

а)



б)

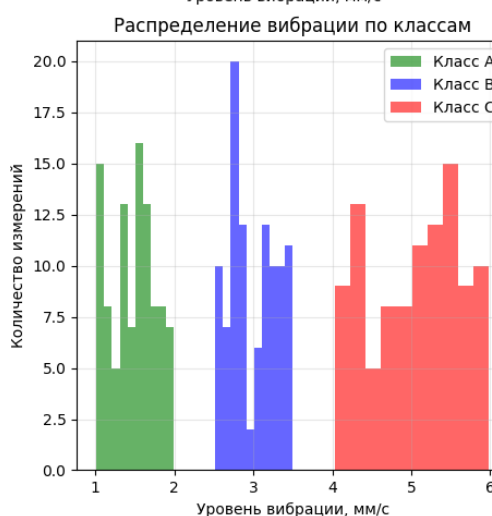


Рис. 4. Пример вывода интерфейса режима работы 200–210 мин⁻¹ 0–4 В движительно-рулевых комплексов Azipod®

Как видно из рисунка 4, на характерном режиме эксплуатации (200–210 мин⁻¹, угол поворота 0–4 В) данные движительно-рулевых комплексов Azipod® формируют 3 кластера (класса) LID. Класс С демонстрирует ярко выраженные особенности: высокий уровень вибрации и значительный разброс значений в выборке. Это указывает не на дефект подшипниковых узлов, а на работу в условиях повышенной нагрузки, характерной для движения судна во льдах.

Научная новизна работы состоит в формулировке методических основ создания архитектуры и функциональной модели систем диагностики на платформе Big Data, адаптированных для движительно-рулевых комплексов Azipod®. Представленная функциональная модель в среде больших данных Big Data современной системы диагностики движительно-рулевых комплексов Azipod® фирмы ABB, установленных на морском судне-снабженце

Параметр LID,% (Load Index Digital) представляет собой синтетический диагностический показатель, формируемый в среде Big Data на основе вибрационных характеристик, измеряемых датчиками на подшипниковых узлах Azipod®, и режимных параметров, определяющих скоростные и маневренные характеристики судна частоты вращения гребного вала и угла поворота колонки.

Таким образом, LID,% количественно отражает относительное изменение гидродинамической нагрузки на движительно-рулевой комплекс в рамках концепции «цифровых близнецов режимов», обеспечивающей сравнение данных в идентичных эксплуатационных условиях.

Заключение

На основе анализа элементов и функций исследуемой системы мониторинга современных движительно-рулевых комплексов Azipod® представлена возможная архитектура и

функциональная модель Big Data, реализованная по принципу «Data Lake» (озеро данных).

В работе использовались методы ETL-обработки потоков данных, основанные на принципах Big Data и обеспечивающие высокоскоростной доступ к информации для аналитики и визуализации благодаря этапам очистки, преобразования и обогащения данных с системы мониторинга судовых движительно-рулевых комплексов Azipod®V.

Разработанный блок обработки данных, реализующий расчёт нового для диагностической практики синтетического параметра (LID), обеспечивает идентификацию различных режимов работы, включая эксплуатацию в ледовых условиях, на обширных и неоднородных выборках.

Разрабатываемая диагностическая платформа в рамках цифровой трансформации технической эксплуатации СЭУ представляет собой важный фундамент и практический инструмент для перехода от традиционного судоходства к интеллектуальному и автономному морскому транспорту.

Литература

1. Системы автоматизации и диагностирования дизелей и газовых двигателей (материалы конгресса CIMAC-2016) // Двигателестроение 2019 №1 – С. 39–56.
2. Нагметова Айгерим. Эволюция методов анализа данных: от традиционной статистики к машинному обучению. Международный научный журнал «ВЕСТНИК НАУКИ» № 6 (87) Том 4. Июнь 2025 г.
3. Lisana Berber and others Machine learning operations landscape: platforms and tools. Artificial Intelligence Review (2025) 58:167. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11164-3>.
4. Binnur Demir Erdem, Mahmut Ahsen Savaş & Kamil Dimililer. Machine Learning in Fault Diagnosis of Electromechanical Devices Using Vibration Measurements. Science, Engineering Management and Information Technology. 2023.
5. К вопросу оценки технического состояния судовых технических средств морских судов по параметрам вибрации / Николаев Н.И., Мышинский Э.Л., Гриценко М.В. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2020. № 60-61. С. 84-90.
6. Каракаев А.Б., Хекерт Е.В., Трапезникова Д.А. Методы оптимизации алгоритмов управления судовыми электроэнергетическими системами с целью повышения качества оптимизации. Эксплуатация морского транспорта. 2022. № 2 (103). С. 76-79.
7. Predictive Maintenance. Wärtsilä [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wartsila.com/services/digital-services/predictive-maintenance>.
8. Digital solutions for two-stroke engines MAN Energy Solutions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.man-es.com/marine/products/digital-solutions>.
9. Platform functions, advantages of its use and information on compatibility with various types of installations, including marine ones [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mtu-solutions.com/en/products/digital-solutions/mtu-go.html>.
10. Predictive maintenance shifts maintenance from a routine-based to a condition-based approach. ABB. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://new.abb.com/service/abb-ability>.
11. Z. Chen, Y. Li, H. Wang, and S. Zhang. "A deep learning-based method for forecasting the remaining useful life of marine diesel engines." Ocean Engineering, Volume 268, 15 January 2023, Article 113386. (DOI):<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113386>
12. J. Wang, C. Wang, S. Song, Y. Zhang. "Digital twin-driven framework for fault diagnosis and remote monitoring of marine power systems." Advanced Engineering Informatics, Volume 56, April 2023, Article 101971. (DOI):<https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.101971>
13. L. Müller, R. Singh, P. Fischer. "Unsupervised Anomaly Detection for Sensor Data of Marine Engines Using Variational Autoencoders." IEEE Sensors Journal, 2023. (DOI):<https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3238226>
14. X. Li, H. Wang, Z. Liu, Y. Yang. A condition monitoring and fault diagnosis method for marine turbochargers based on convolutional neural network and support vector machine." Measurement, 2022.(DOI):<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111966>.
15. X. Zhao, Y. Cai, G. Chen "A predictive maintenance scheduling framework for marine vessels using digital twin and deep reinforcement learning." Computers & Industrial Engineering, 2023.(DOI):<https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109662>.
16. P. Liu, H. Zhang, M. Królczyk, Z. Li "An integrated method for condition monitoring of marine engines based on lubricating oil analysis and operational data fusion." Tribology International, 2023.(DOI):<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108856>.
17. Ingo Müller, Christoph Kelling, Jonas Vorwerk. From data warehouse to data lake: Rethinking the role of data architecture in modern organizations. Information Systems and e-Business Management, 2023. (DOI):[10.1007/s10257-023-00609-y](https://doi.org/10.1007/s10257-023-00609-y).

18. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication [Электронный ресурс] // Florida Institute of Technology. — 2014. — URL: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication (дата обращения: 20.11.2023). — [Белая книга].
19. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems // Manufacturing Letters. — 2015. — Vol. 3. — P. 18–23. — DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
20. Provost F., Fawcett T. Data Science for Business: What You Need to Know About Data Mining and Data-Analytic Thinking. — 1st ed. — O'Reilly Media, 2013. — 414 p. — ISBN 978-1-449-36132-7.
21. Si X.-S., Wang W., Hu C.-H., Zhou D.-H. Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches // European Journal of Operational Research. — 2011. — Vol. 213, № 1. — P. 1–14. — DOI: 10.1016/j.ejor.2010.11.018.
22. Lee J. et al. Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2014. — Vol. 42, № 1–2. — P. 314–334. — DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.06.004.
23. Brynjolfsson E., McAfee A. The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies. — 1st ed. — W. W. Norton & Company, 2014. — 320 p. — ISBN 978-0393239355.
24. Domingos P. A few useful things to know about machine learning // Communications of the ACM. — 2012. — Vol. 55, № 10. — P. 78–87. — DOI: 10.1145/2347736.2347755.
25. Johnson M. K. Big Data Analytics and Digital Technologies in Marine Power Plants / M. K. Johnson, S. R. Peterson // in: Advanced Marine Engineering and Digitalization / ed. by L. E. Conway. — New York : Springer, 2023. — 287 p.
26. Ester, M. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise / M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, X. Xu // Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'96). — Portland, OR, 1996. — P. 226–231.
27. Liu, H. Fault diagnosis of rotating machinery based on improved DBSCAN and support vector machine / H. Liu, J. Li, L. Zhang // Measurement Science and Technology. — 2020. — Vol. 31, no. 3. — P. 035004. — DOI: 10.1088/1361-6501/ab4a3a.
28. Методы кластеризации больших данных: учебное пособие / А.В. Барсегян [и др.]. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2019. — 320 с. — ISBN 978-5-9775-4094-5.

References

1. Sistemy avtomatizacii i diagnostirovaniya dizelej i gazovyh dvigatelej [Automation and diagnostics systems for diesel and gas engines] (materialy kongressa CIMAC-2016) // Dvigatelistroenie 2019 №1 – S. 39–56.
2. Nagmetova Ajgerim. Jevoljucija metodov analiza dannyh: ot tradicionnoj statistiki k mashinnomu obucheniju [The evolution of data analysis methods: from traditional statistics to machine learning]. Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «VESTNIK NAUKI» № 6 (87) Tom 4. Ijun' 2025 g.
3. Lisana Berber and others Machine learning operations landscape: platforms and tools. Artificial Intelligence Review (2025) 58:167. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11164-3>.
4. Binnur Demir Erdem, Mahmut Ahsen Savaş & Kamil Dimililer. Machine Learning in Fault Diagnosis of Electromechanical Devices Using Vibration Measurements. Science, Engineering Management and Information Technology. 2023.
5. K voprosu ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya sudovyh tekhnicheskikh sredstv morskikh sudov po parametram vibracii [On the issue of assessing the technical condition of marine technical equipment of sea vessels based on vibration parameters] / Nikolaev N.I., Myshinskij E.L., Gricenko M.V. // Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva. 2020. № 60-61. S. 84-90.
6. Karakaev A.B., Hekert E.V., Trapeznikova D.A. Metody optimizacii algoritmov upravleniya sudovymi elektroenergeticheskimi sistemami s cel'yu povysheniya kachestva optimizacii [Methods for optimizing control algorithms for ship electrical power systems in order to improve the quality of optimization]. Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2022. № 2 (103). S. 76-79.
7. Predictive Maintenance. Wärtsilä [Elektronnyj resurs]. — Режим доступа: <https://www.wartsila.com/services/digital-services/predictive-maintenance>.
8. Digital solutions for two-stroke engines MAN Energy Solutions [Elektronnyj resurs]. — Режим доступа: <https://www.man-es.com/marine/products/digital-solutions>.
9. Platform functions, advantages of its use and information on compatibility with various types of installations, including marine ones [Elektronnyj resurs]. — Режим доступа: <https://www.mtu-solutions.com/en/products/digital-solutions/mtu-go.html>.
10. Predictive maintenance shifts maintenance from a routine-based to a condition-based approach. ABB. [Elektronnyj resurs]. — Режим доступа: <https://new.abb.com/service/abb-ability>.
11. Z. Chen, Y. Li, H. Wang, and S. Zhang. "A deep learning-based method for forecasting the remaining useful life of marine diesel engines." Ocean Engineering, Volume 268, 15 January 2023, Article 113386. (DOI): <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113386>
12. J. Wang, C. Wang, S. Song, Y. Zhang. "Digital twin-driven framework for fault diagnosis and remote monitoring of marine power systems." Advanced Engineering Informatics, Volume 56, April 2023, Article 101971. (DOI): <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.101971>
13. L. Müller, R. Singh, P. Fischer. "Unsupervised Anomaly Detection for Sensor Data of Marine Engines Using Variational Autoencoders." IEEE Sensors Journal, 2023. (DOI): <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3238226>

14. X. Li, H. Wang, Z. Liu, Y. Yang. A condition monitoring and fault diagnosis method for marine turbochargers based on convolutional neural network and support vector machine." *Measurement*, 2022.(DOI):<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111966>.
15. X. Zhao, Y. Cai, G. Chen "A predictive maintenance scheduling framework for marine vessels using digital twin and deep reinforcement learning." *Computers & Industrial Engineering*, 2023.(DOI):<https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109662>.
16. P. Liu, H. Zhang, M. Królczyk, Z. Li "An integrated method for condition monitoring of marine engines based on lubricating oil analysis and operational data fusion." *Tribology International*, 2023.(DOI):<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108856>.
17. Ingo Müller, Christoph Kelling, Jonas Vorwerk. From data warehouse to data lake: Rethinking the role of data architecture in modern organizations. *Information Systems and e-Business Management*, 2023. (DOI):10.1007/s10257-023-00609-y.
18. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication [Электронный ресурс] // Florida Institute of Technology. — 2014. — URL: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication (дата обращения: 20.11.2023). — [Белая книга].
19. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems // *Manufacturing Letters*. — 2015. — Vol. 3. — P. 18–23. — DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
20. Provost F., Fawcett T. *Data Science for Business: What You Need to Know About Data Mining and Data-Analytic Thinking*. — 1st ed. — O'Reilly Media, 2013. — 414 p. — ISBN 978-1-449-36132-7.
21. Si X.-S., Wang W., Hu C.-H., Zhou D.-H. Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches // *European Journal of Operational Research*. — 2011. — Vol. 213, № 1. — P. 1–14. — DOI: 10.1016/j.ejor.2010.11.018.
22. Lee J. et al. Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications // *Mechanical Systems and Signal Processing*. — 2014. — Vol. 42, № 1–2. — P. 314–334. — DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.06.004.
23. Brynjolfsson E., McAfee A. *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*. — 1st ed. — W. W. Norton & Company, 2014. — 320 p. — ISBN 978-0393239355.
24. Domingos P. A few useful things to know about machine learning // *Communications of the ACM*. — 2012. — Vol. 55, № 10. — P. 78–87. — DOI: 10.1145/2347736.2347755.
25. Johnson M. K. Big Data Analytics and Digital Technologies in Marine Power Plants / M. K. Johnson, S. R. Peterson // in: *Advanced Marine Engineering and Digitalization* / ed. by L. E. Conway. — New York : Springer, 2023. — 287 p.
26. Ester, M. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise / M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, X. Xu // *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'96)*. — Portland, OR, 1996. — P. 226–231.
27. Liu, H. Fault diagnosis of rotating machinery based on improved DBSCAN and support vector machine / H. Liu, J. Li, L. Zhang // *Measurement Science and Technology*. — 2020. — Vol. 31, no. 3. — P. 035004. — DOI: 10.1088/1361-6501/ab4a3a.
28. Metody` klasterizacii bol'shix danny`x [Big Data Clustering Methods]: учебное пособие / A.V. Barseganyan [i dr.]. — Sankt-Peterburg: BXV-Peterburg, 2019. — 320 s. — ISBN 978-5-9775-4094-5.

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

Герасиди Виктор Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93, e-mail: gerasidi@rambler.ru

Viktor V. Gerasidi, Ph.D. (Eng), the assistant professor of department operation of marine mechanical installations, Admiral Ushakov State Maritime University Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93, e-mail: gerasidi@rambler.ru

Статья поступила в редакцию /the article was submitted 09.12.2025.

Одобрена после рецензирования /approved after reviewing 12.01.2026.

Принята к публикации /accepted for publication 10.02.2026.

Научная статья

УДК 004

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.014>**Возможности местного и удаленного мониторинга оборудования автономного судна**Епихин А.И.¹ bsmbeton@mail.ru, Кондратьев С.И.¹ zur_mga@nsma.ru, Хекерт Е.В.¹ zur_mga@nsma.ru¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. Отрасль морских перевозок сегодня находится на пороге революции благодаря технологии автономных судов. Эта инновация уже продемонстрировала значительный прогресс. Эффективность беспилотных автономных систем зависит от двух ключевых факторов: детального предварительного планирования и предиктивного обслуживания оборудования, находящегося на борту, что гарантирует безопасность навигации. С учетом отмеченного, в статье рассмотрены возможности местного и удаленного мониторинга оборудования автономного судна. Детализированы схемы каждой системы, описан набор наблюдаемых показателей и средств организации связи. В статье проведен сравнительный анализ систем мониторинга автономных судов, таких как бортовой (локальный) и удаленный (береговой) мониторинг. В этом контексте рассмотрены следующие характеристики – необходимость, стоимость реализации, надёжность и отказоустойчивость данных систем. В рамках данной статьи предложено следующее определение: система систем — это крупномасштабная интеграция множества независимых элементов, ориентированных на выполнение определенных задач, с целью создания более крупной и сложной системы, которая обеспечивает больше функциональных возможностей и более высокую производительность, чем просто сумма отдельно составляющих частей. Предложена архитектура «системы систем» для поддержаний функций локального и удаленного мониторинга оборудования МАНС и сети для локального мониторинга оборудования автономного судна. Приведены ключевые параметры мониторинга оборудования морского автономного морского судна. выделены особенности организации надёжной связи, обеспечивающей поддержку с берега и своевременную передачу данных о судне для анализа. Параметры связи. Алгоритмы и аналитика

Ключевые слова: мониторинг, датчики, автономное судно, связь, данные.

Для цитирования: Епихин А.И., Кондратьев С.И., Хекерт Е.В. Возможности местного и удаленного мониторинга оборудования автономного судна, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 133—138. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.014.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.014>**Local and remote monitoring capabilities for autonomous vessel equipment**Aleksey I. Epikhin¹ bsmbeton@mail.ru, Sergey I. Kondratyev¹ zur_mga@nsma.ru,Evgeny V. Khekert¹ zur_mga@nsma.ru¹Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. The maritime transportation industry is currently on the brink of a revolution thanks to autonomous vessel technology. This innovation has already demonstrated significant progress. The effectiveness of unmanned autonomous systems depends on two key factors: detailed pre-planning and predictive maintenance of onboard equipment, which ensures safe navigation. With this in mind, this article examines the capabilities of local and remote monitoring of autonomous vessel equipment. Detailed diagrams of each system are provided, along with a description of the set of monitored parameters and communication tools. The article also provides a comparative analysis of autonomous vessel monitoring systems, including onboard (local) and remote (shore) monitoring. In this context, the following characteristics are considered: necessity, implementation cost, reliability, and fault tolerance of these systems. This article proposes the following definition: a system of systems is the large-scale integration of multiple independent elements, focused on performing specific tasks, to create a larger, more complex system that provides greater functionality and higher performance than the sum of its individual components. A "system of systems" architecture is proposed for supporting local and remote monitoring of MASS equipment and a network for local monitoring of autonomous vessel equipment. Key parameters for monitoring the equipment of an autonomous marine vessel are presented. The features of a reliable communications system, ensuring shore support and timely transmission of vessel data for analysis, are highlighted.

Keywords: monitoring, sensors, autonomous ship, communication, data.

For citation: Aleksey I. Epikhin, Sergey I. Kondratyev, Evgeny V. Khekert Local and remote monitoring capabilities for autonomous vessel equipment, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 133—138. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.014.

Введение

За последние три года в области разработки морских автономных технологий достигнут

значительный прогресс. На сегодняшний день во многих странах мира продолжают проекты по испытанию беспилотных технологий. Согласно данным Международной морской организации,

мировой объем рынка автономных судов 2024 году оценивался примерно в 5,17 млрд долларов США. По прогнозам, к 2030 году он удвоится, а к 2032 году достигнет отметки 10,19 млрд долларов США. При этом среднегодовой темп роста (CAGR) ожидается на уровне 9-9,6% в период с 2022 по 2032 год [1]. В России наблюдается активизация разработок и локального производства надводных и подводных беспилотных судов, которые призваны решать широкий спектр как военных, так и гражданских, а также научно-исследовательских задач.

Цель и задачи. Отбор прототипов – как фактографическая основа имитационного моделирования надежности функционирования судовых электроустановок

Автономное судоходство — это эксплуатация самоуправляемых судов, которые используют искусственный интеллект, датчики и автоматические навигационные системы. Эти суда работают благодаря передовым методам анализа данных, GPS и дистанционному мониторингу для оптимизации маршрутов, повышения безопасности и эффективности выполняемых задач [2]. Беспилотные водные аппараты (БВА) разрабатываются для работы в полностью автономном режиме, когда цель заранее запрограммирована и затем выполняется без вмешательства человека. Также БВА создаются для работы в полуавтономном режиме, в этом случае наземный или корабельный центр дистанционного управления остается на связи с БВА и посылает ему команды для выполнения необходимой миссии.

Не подлежит сомнению тот факт, что БВА обладают значительными преимуществами, однако их использование сопряжено с рядом проблем, способных снизить эффективность эксплуатации. Независимо от того, могут ли такие платформы перемещаться в ходе выполнения задач (например, дроны) или являются стационарными (например, дрейфующие буи), их результативность напрямую зависит от безотказной работы бортового оборудования, энергетических и механических установок. БВА обеспечивают расширенное покрытие акваторий, однако одновременно генерируют огромные массивы данных, что становится серьезным вызовом для их обработки и анализа. В связи с этим актуальными являются задачи организации как локального, так и удаленного мониторинга оборудования БВА.

Таким образом, принимая во внимание тот факт, что раннее обнаружение проблем в механических системах и двигателе автономного судна критически важно для его безопасности, а также для контроля эффективности, распознавания отклонений и оптимизации производительности, тема данной статьи является актуальной, теоретически и практически значимой.

Материалы и методы. Формализация имитационной модели функционирования элементов судовых электроустановок

Особенности, достоинства и недостатки экспертных систем, которые используются для выявления неисправностей в работе автономных судов на основе анализа симптомов и сигнатур неполадок, описывают в своих трудах Герасиди В. В., Николаев Н. И., Лисаченко А. В., Qiang Li, Li Yang, Mengxuan Ma, Xiaochuan Wu, Weibo Deng, Xin Zhang.

Подходы к созданию удаленного сервера для передачи аудио и других данных в виртуальный симулятор машинного отделения БВА, создания гипотетических сценариев отказов оборудования для тестирования и обучения систем управления детально изучают Тарасенко В. А., Горбунов В. Ю., Заслонов В. В., Головина А. А., Thomas M. DeCarlo, Leticia Cavole, Gabriel Castro-Falcón.

Активное развитие данной предметной области, новизна разработок и проектов порождают широкий спектр дискуссионных и нерешенных вопросов относительно контроля и диагностики работы БВА. Так, например, нерешенной остается задача целевого проектирования и оценки рисков сложных киберфизических систем, составляющих структуру БВА. Кроме того, в связи с растущим объемом данных, собираемых на борту судна, потребность в автономных инфраструктурах анализа и хранения данных, а также в улучшении связи в море для их эффективного использования, становится всё более острой и требует отдельного внимания экспертов и исследователей.

Таким образом цель статьи заключается в проведении анализа возможностей местного и удаленного мониторинга оборудования автономного судна.

Реализация функций локального и удаленного мониторинга оборудования автономного судна требует комплексной межсистемной интеграции, включающей взаимодействие человек–машина, а также углублённой координации с внешними инфраструктурными системами, в частности с системой управления движением судов (системой управления морским трафиком) [3]. С учетом отмеченных требований, считаем, что принцип концепции эксплуатации, который широко используется в системном и программном инжиниринге, может быть адаптирован для применения при внедрении функций местного и удаленного мониторинга. Для более предметного рассмотрения особенностей реализации этого принципа на практике представляется целесообразным формализовать особенности систем местного и удаленного мониторинга, что позволит понять их взаимодополняемость и ожидаемый от совместного функционирования эффект (см. табл. 1).

Таблица 1

Сравнительный анализ систем мониторинга автономных судов		
Критерий оценки	Бортовой (локальный) мониторинг	Удалённый (береговой) мониторинг
Необходимость	- Критически важен для обеспечения автономности судна. - Обеспечивает функционирование и принятие решений в реальном времени, включая работу при полной потере внешнего канала связи. - Гарантирует безопасность за счёт мгновенного реагирования на аварийные ситуации (возгорание, затопление, отказ оборудования).	Предоставляет возможности прогностического обслуживания, планирования ремонтов и оптимизации ресурсов. Обеспечивает централизованное управление флотом, координацию и удалённое обновление программного обеспечения.
Стоимость реализации	Капитальные затраты: высокие (инвестиции в оборудование промышленного класса с высокой надёжностью). Эксплуатационные расходы: низкие (минимальные затраты на каналы связи).	Капитальные затраты: умеренные (инвестиции в береговой центр обработки данных). Эксплуатационные расходы: высокие (подписка на облачные сервисы, аренда каналов связи).
Надёжность и отказоустойчивость	Обеспечивается дублированием критических компонентов и устойчивостью к механическим воздействиям (соответствие MIL-STD-810G). Среднее время наработки на отказ (MTBF): более 50 000 часов.	Определяется стабильностью канала связи и надёжностью инфраструктуры центра обработки данных. MTBF: зависит от качества сторонних сервисов.
Параметры связи	Задержка передачи: 0,1–1 мс (внутренняя шина CAN, Ethernet). Потери данных: <0,01 %.	Задержка передачи: 10–1000 мс (сотовая или спутниковая связь). Потери данных: 0,1–5 % (зависят от погодных и географических условий).
Алгоритмы и аналитика	Обработка данных: в режиме реального времени, вычислительная мощность ~500 GFLOPS (GPU). Принятие решений: полностью автономное, задержка реакции <100 мс.	Обработка данных: отложенная, в облачной инфраструктуре, вычислительная мощность ~200 TFLOPS (GPU-кластеры). Принятие решений: прогностическое, с использованием методов анализа больших данных.

В целом, функция локального и удалённого мониторинга оборудования автономного судна может обеспечиваться одной системой. Однако более вероятно, что она будет поддерживаться несколькими составными системами, работающими совместно как система систем [4]. Хотя концепция системы систем не является новой, в морской отрасли нет единого определения термина «система систем». В рамках данной статьи предлагаем использовать следующее определение: система систем — это крупномасштабная интеграция множества независимых элементов, ориентированных на выполнение определенных задач, с целью создания более крупной и сложной системы, которая обеспечивает больше функциональных возможностей и более высокую производительность, чем просто сумма отдельно составляющих частей.

На рис. 1 представлена предлагаемая архитектура «системы систем», которая может использоваться для поддержаний функций локального и удалённого мониторинга оборудования автономного судна.

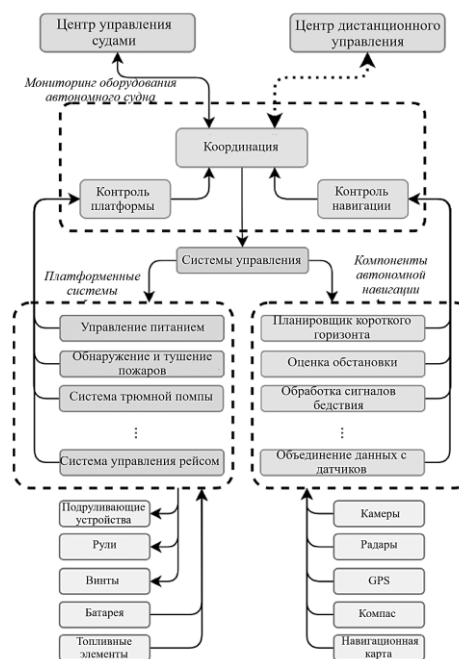


Рис. 1. Архитектура «системы систем» для поддержаний функций локального и удалённого мониторинга оборудования МАНС

Локальная система мониторинга оборудования автономного судна

Хотя рассматриваемая система мониторинга является локальной, как уже отмечалось ранее, она нуждается в подключении как внутри судна, так и снаружи, чтобы удовлетворить требования различных подсистем и служб. Внутрисудовые сети в основном могут быть реализованы с помощью кабелей, в тоже время, существуют возможности применения беспроводных соединений, например, для различных датчиков окружающей среды [5]. Соединения между судном и внешними устройствами являются беспроводными.

Архитектура сети для локального мониторинга оборудования БВА представлена на рис. 2.



Рис. 2. Архитектура сети для локального мониторинга оборудования автономного судна

Результаты

Итак, в рамках локального мониторинга бортовые датчики измеряют расход топлива, состояние главного двигателя, состояние судна и состояние загрузки судна в режиме реального времени, а также другие показатели. В таблице 1 приведены некоторые описания соответствующих данных.

Данные поступают из разных систем, и частота их сбора не одинакова. Расход топлива считывается с массового расходомера каждую секунду с помощью специального устройства связи. Данные о состоянии двигателя отправляются из системы мониторинга и сигнализации каждые 30 секунд через сеть Ethernet. Данные, такие как скорость и осадка судна, относительная скорость и направление ветра, считаются из системы на мостике с помощью последовательной связи с частотой примерно 10 секунд. Для интеграции всех систем с одинаковыми интервалами платформа записывает данные каждую минуту. Сведения с датчиков с частотой более одной минуты усредняются, что также служит фильтром. В дополнение к средним показателям также рассчитывается и записывается стандартное отклонение высокочастотных данных. Данные помечаются как аномальные, если стандартное отклонение превышает определенный порог [7].

Таблица 2

Ключевые параметры мониторинга оборудования автономного морского судна

Категория	Параметр	Ед. изм.	Описание
Топливная система	Текущий расход топлива главного двигателя	кг/ч	Мгновенный расход топлива для оценки эффективности работы и планирования запаса хода
	Давление топлива на входе в топливный насос	бар	Обеспечивает контроль корректной подачи топлива к цилиндрам
	Температура подаваемого топлива	°C	Влияет на вязкость и качество распыления при впрыске
Главный двигатель	Частота вращения гребного вала	об/мин	Определяет режим работы главного двигателя и пропульсивного комплекса
	Крутящий момент на гребном валу	кН·м	Характеризует нагрузку на движитель
	Мощность на гребном валу	кВт	Мощность, передаваемая от двигателя на винт
	Температура охлаждающей жидкости главного двигателя	°C	Позволяет контролировать тепловой режим работы
	Давление масла в системе смазки главного двигателя	бар	Критично для предотвращения износа и заклинивания механизмов
Двигательно-рулевой комплекс	Угол перекадки руля	°	Положение пера руля относительно диаметральной плоскости судна
	Частота вращения гребного винта	об/мин	Определяет фактическую скорость вращения движителя
	Коэффициент скольжения гребного винта	%	Разница между теоретической и фактической скоростью хода судна
Энергетическая система	Выходная электрическая мощность генератора	кВт	Количество вырабатываемой электроэнергии
	Напряжение судовой электросети	В	Напряжение питания судовых систем
	Суммарный ток нагрузки в сети	А	Общий ток, потребляемый оборудованием судна
Состояние судна	Скорость судна относительно воды	уз	Измеряется лагом, используется для расчёта гидродинамических параметров
	Скорость судна относительно грунта	уз	Определяется по данным GPS, учитывает течение
	Курсовой угол судна	°	Пеленг носовой части судна относительно истинного или магнитного севера

Система удаленного мониторинга оборудования автономного судна

Задача системы удаленного мониторинга заключается в выполнении управляющего

алгоритма, который направлен на контроль и достижение оптимальных параметров работы конкретного оборудования, а в свою очередь, всей системы БВА в целом. Такая система позволяет отслеживать и контролировать не только отдельные

машины, устройства и установки, но и целые системы – механические и электрические (такие как компрессоры, генераторы, насосы, реле, клапаны) [7]. В настоящее время в морской автоматизации наиболее распространенным решением является

конфигурация распределенных (децентрализованных) программируемых систем микропроцессоров – свободно программируемых контроллеров для реализации системы удаленного мониторинга БВА (см. рис. 3).

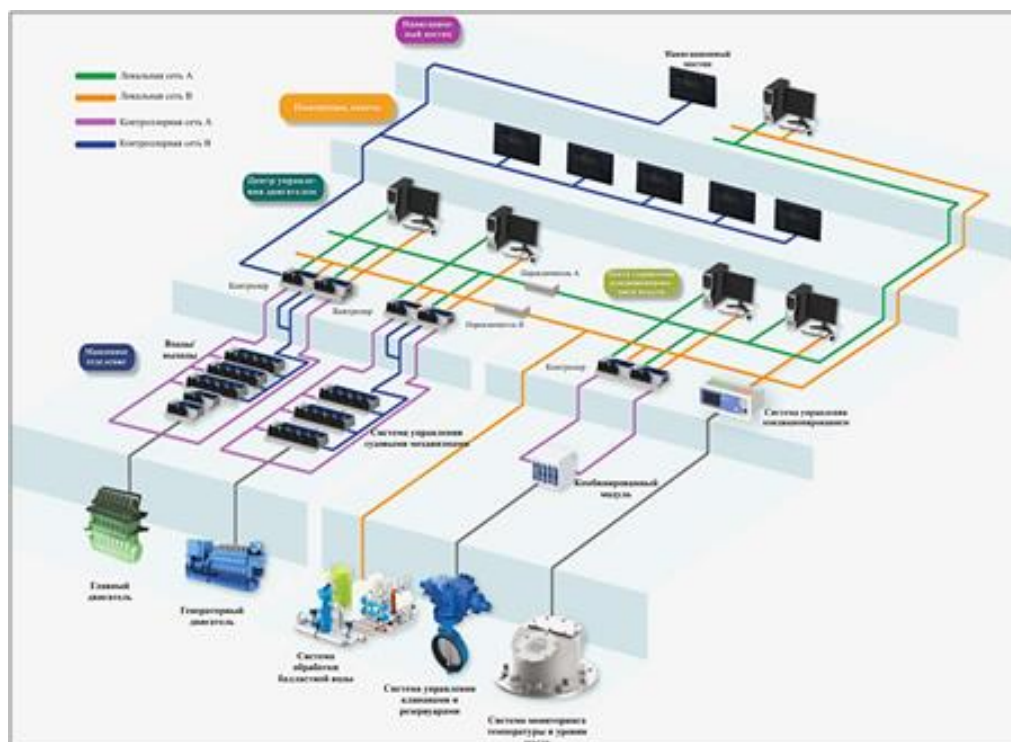


Рис. 3. Схема удаленного мониторинга оборудования автономного судна

Представленная на рис. 3 схема состоит из трех основных уровней, соединенных между собой с помощью сети связи: управление, контроллер и объекты.

Выводы

Таким образом, подводя итоги, отметим, что согласно прогнозам, автономные суда существенно изменят ситуацию в морской отрасли. Они обещают сократить расходы и уменьшить вред, наносимый окружающей среде, кроме того, открывают широкие возможности для повышения производительности. В данном контексте

важное значение приобретает раннее обнаружение проблем в системах судна, которое критически важно для его безопасности, а также для контроля эффективности, распознавания отклонений и оптимизации работы. В статье рассмотрены возможности местного и удаленного мониторинга оборудования автономного судна. Представлены схемы по каждой системе, ключевые параметры мониторинга, выделены особенности организации надежной связи, обеспечивающей поддержку с берега и своевременную передачу данных о судне для анализа.

Литература

1. Arief Sartono, Mulyanto Darmawan Environmental Monitoring of Shallow Marine Waters Using AI and Remote Sensing: A Systematic Literature Review. Environmental Quality Management, 2025, Volume 35, Issue 1, P. 120-128.
2. Успенская, Е. Н. Анализ и разработка требований к системе удаленной диагностики распределенных систем судового оборудования в арктической зоне. International Journal of Open Information Technologies, 2022, Т. 10, № 8, С. 51-61.
3. Аллакин, В. В. Метод удаленного мониторинга функционального состояния средств связи и навигационного оборудования Росморречфлота. Научные технологии в космических исследованиях Земли, 2023, Т. 15, № 1, С. 10-20.
4. Zhengjie Jiang, Ming Xu Simulation method for infrared radiation transmission characteristics of typical ship targets based on optical remote sensing. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2022, № 6, P. 100-109.
5. Васильков, Д. В. Удаленный мониторинг и диагностика автономных технологических объектов. Металлообработка, 2022, № 5-6, С. 66-77.
6. Liming Zhou, Yahui Li Ship Target Detection in Optical Remote Sensing Images Based on Multiscale Feature Enhancement. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, Volume 18, Issue 29, P. 78-85.
7. Xingshan Chang, Xiaojian Xu Predicting steady degradation in ship power system: A deep learning approach based on comprehensive monitoring parameters. IET Intelligent Transport Systems, 2024, Volume 18, P. 107-118.

References

1. Arief Sartono, Mulyanto Darmawan Environmental Monitoring of Shallow Marine Waters Using AI and Remote Sensing: A Systematic Literature Review. Environmental Quality Management, 2025, Volume 35, Issue 1, P. 120-128.
2. Uspenskaya, E. N. Analiz i razrabotka trebovaniy k sisteme udalenoj diagnostiki raspredelennyh sistem sudovogo oborudovaniya v arkticheskoy zone [Analysis and development of requirements for a remote diagnostics system for distributed systems of ship equipment in the Arctic zone]. International Journal of Open Information Technologies, 2022, Vol. 10, No. 8, P. 51-61.
3. Allakin, V. V. Metod udalennogo monitoringa funktsional'nogo sostoyaniya sredstv svyazi i navigatsionnogo oborudovaniya Rosmorrechflota [Method of remote monitoring of the functional state of communication and navigation equipment of Rosmorrechflot]. Science-Intensive Technologies in Earth Space Research, 2023, Vol. 15, No. 1, P. 10-20.
4. Zhengjie Jiang, Ming Xu Simulation method for infrared radiation transmission characteristics of typical ship targets based on optical remote sensing. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2022. № 6, P. 100-109.
5. Vasilkov, D. V. Udalennyj monitoring i diagnostika avtonomnyh tekhnologicheskikh ob"ektov [Remote monitoring and diagnostics of autonomous technological objects]. Metalworking, 2022, No. 5-6, P. 66-77.
6. Liming Zhou, Yahui Li Ship Target Detection in Optical Remote Sensing Images Based on Multiscale Feature Enhancement. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, Volume 18, Issue 29, P. 78-85.
7. Xingshan Chang, Xiaojian Xu Predicting steady degradation in ship power system: A deep learning approach based on comprehensive monitoring parameters. IET Intelligent Transport Systems, 2024, Volume 18, P. 107-118.

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

Епихин Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры эксплуатации судовых механических установок, Новороссийский государственный морской университет, 353924, Новороссийск, пр-т. Ленина, 93, e-mail: bsmbeton@mail.ru

Aleksey I. Epikhin, Ph.D. (Eng), Assistant Professor, Head of the Department of Operation of Marine Mechanical Installations, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 353924, Novorossiysk, Lenin Ave., 93, e-mail: bsmbeton@mail.ru

Хекерт Евгений Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовождения, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924 г. Новороссийск, пр.Ленина,93, e-mail: zheny71@mail.ru

Evgeniy V. Khekert, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Navigation, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 353924, Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93, e-mail: zheny71@mail.ru

Кондратьев Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовождения, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924 г. Новороссийск, пр.Ленина,93, e-mail: sikondr@gmail.com

Sergey I. Kondratyev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Navigation, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 353924, Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93, e-mail: sikondr@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 19.09.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.12.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 10.02.2026.

Научная статья

УДК 621.438

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.015>

Исследование гибких комбинированных микрогазотурбинных установок с использованием местных климатических ресурсов холода на частичных нагрузках

Дологлонян А.В.¹ dologlonyan@mail.ru, Матвеев В.Т.¹ mvt3900@mail.ru,
Клименко А.Г.¹ kag195877@gmail.com, Владецкая Е.А.² vladetski@gmail.com

¹Институт природно-технических систем

²Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. Предметом рассмотрения в статье являются исследования комбинированных микрогазотурбинных установок (МГТУ), использующих местные климатические ресурсы холода с помощью утилизационных установок органического цикла Ренкина (ОЦР) на частичных нагрузках. Рассмотрены схемы комбинированных МГТУ с параллельным блоком утилизации теплоты, содержащим установку ОЦР с дополнительной (сезонной) турбиной и котлом-утилизатором, осуществляющим теплоснабжение объекта. В качестве рабочих тел установок ОЦР использовались аммиак и хладагент R-134a, поскольку они обеспечивают давления конденсации выше атмосферного при низких температурах окружающей среды. Установлено, что сезонные колебания температуры окружающего воздуха в сибирском регионе Северного морского пути оказывают существенное влияние на эффективность как когенерационных, так и комбинированных МГТУ, особенно на установки, содержащие регенератор теплоты в составе двигателя. Показано, что наличие дополнительной турбины в составе установки ОЦР повышает эффективность комбинированных МГТУ в широком диапазоне нагрузок на различных режимах нагружения.

Ключевые слова: микрогазотурбинная установка, регенерация теплоты, турбина перерасширения, турбокомпрессорный утилизатор, органический цикл Ренкина, дополнительная турбина, рабочее тело, климатический ресурс холода, частичные нагрузки.

Финансирование: Работа выполнена по госбюджетной теме ИПТС «Создание научных основ разработки гибких комбинированных установок с интегрированными возобновляемыми источниками энергии и использованием местных ресурсов холода (FFMM-2024-0018)» (№ госрегистрации 124020100121-6).

Для цитирования: Дологлонян А.В., Матвеев В.Т., Клименко А.Г., Владецкая Е.А. Исследование гибких комбинированных микрогазотурбинных установок с использованием местных климатических ресурсов холода на частичных нагрузках, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 139—157. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.015.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.015>

Study of flexible combined micro gas turbine plants using local climatic cold resources at partial loads

Andrey V. Dologlonyan¹ dologlonyan@mail.ru, Valerii T. Matveenko¹ mvt3900@mail.ru,
Alexander G. Klimenko¹ kag195877@gmail.com, Ekaterina A. Vladetskaya² vladetski@gmail.com

¹Institute of nature and technical systems, ²Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. The article presents the study of combined micro gas turbine plants (MGTP) using local climatic cold resources with the help of organic Rankine cycle (ORC) waste heat recovery units at partial loads. The article presents the schemes of combined MGTP with a parallel heat recovery unit containing an ORC unit with an additional (seasonal) turbine and a waste heat boiler providing heat supply to the facility. Ammonia and R-134a refrigerant were used as working fluids in the ORC units, since they provide condensation pressures above atmospheric at low ambient temperatures. It was found that seasonal fluctuations in ambient air temperature in the Siberian region of the Northern Sea Route have a significant effect on the efficiency of both cogeneration and combined MGTP, especially on units containing a heat regenerator as part of the engine. It was shown that the presence of an additional turbine in the ORC unit increases the efficiency of combined MGTP in a wide range of loads under various loading conditions.

Key words: microgas turbine plant, heat recovery, overexpansion turbine, turbocharger utilizer, organic Rankine cycle, additional turbine, working fluid, cold climate resource, partial loads.

Financial Support: The work was carried out under the state budget theme of the INTS "Creation of a scientific basis for the development of flexible combined plants with integrated renewable energy sources and the use of local cold resources (FFMM-2024-0018)" (state registration number 124020100121-6).

For citation: Andrey V. Dologlonyan, Valerii T. Matveenko, Alexander G. Klimenko, Ekaterina A. Vladetskaya. Study of flexible combined micro gas turbine plants using local climatic cold resources at partial loads, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 139—157. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.015.

Введение

Малая, точнее, распределенная энергетика особенно важна для энергообеспечения объектов нулевой и первой категории (они должны иметь несколько источников энергоснабжения), для энергообеспечения районов с низкой плотностью нагрузки, для автономного энергоснабжения удаленных объектов, для снабжения в чрезвычайные периоды, а также в отдаленных, труднодоступных и малоосвоенных районах. Основной целью использования когенерационных установок является максимально эффективное использование топлива для комплексного обеспечения потребностей локальных объектов в теплоте и электроэнергии. Для того, чтобы выполнить эту задачу при циклической или переменной нагрузке, компенсируя суточные и сезонные колебания требуется гибкость тепловой и конструктивной схемы когенерационной установки, которая должна быть приспособлена к производству требуемого количества энергии (электрической и тепловой) для разных потребителей.

Для достижения гибкости в объемах производства энергии и высокой тепловой эффективности газотурбинной энергетической установки (ГТУ) можно применить различные тепловые и конструктивные схемы, а также управление потоками теплоты в газотурбинном двигателе (ГТД) [1, 2]. ГТД обладают способностью изменять рабочий процесс за счет управления характеристиками различных элементов двигателя. Изменение характеристик элементов ГТУ и через них процессов в циклах ГТД в определенных условиях может оказывать эффективное управляющее воздействие на изменение теплотехнических характеристик комбинированной ГТУ. Выбор управляемого элемента зависит от тепловой и конструктивной схемы ГТУ, а также от регламента поставки электрической и тепловой энергии.

Изменять тепловую мощность когенерационного ГТД с помощью параллельного блока утилизации теплоты [3], который позволяет перераспределять поток выхлопных газов между установкой органического цикла Ренкина (ОЦР) и котлом-утилизатором. Это имеет большое значение при циклической или переменной тепловой нагрузке. Климат большинства портов сибирского региона Северного морского пути (Игарка, Дудинка и т.д.) является резко континентальным и сезонные перепады температур находится в пределах 40 °С. Это обстоятельство позволяет использовать местный климатический ресурс холода (МРХ) для повышения эффективности установок ОЦР [4, 5].

Для энергоснабжения локальных объектов распространенным вариантом является применение когенерационных микрогазотурбинных установок (МГТУ) мощностью от нескольких киловатт до 1 МВт, освоенных отечественным производителем.

Генератор МГТУ вырабатывает электрическую энергию переменного тока повышенной частоты, которая пропорциональна частоте вращения микротурбины (до 1500...2000 Гц). Для получения напряжения промышленной (50 Гц) или бортовой (400 Гц) частоты, требуется установка либо механического редуктора, как это делает компания Ingersoll-Rand, либо силового управляемого электронного преобразователя (СЭП) [6].

СЭП МГТУ строятся по схеме со звеном постоянного тока (рис. 1). Высокочастотное многофазное (чаще трехфазное) нестабилизированное напряжение генератора сначала выпрямляется, а после с помощью инвертора преобразуется в трехфазное напряжение необходимого качества. Применение такой схемы позволяет легко обеспечить обмен энергией между генератором и нагрузкой. К шине постоянного тока может быть подключен как буферный накопитель электроэнергии, так и другие потребители постоянного тока.



Рис. 1. Функциональная схема силового электронного преобразователя

По сравнению с механическим редуктором применение СЭП снижает потери и упрощает конструкцию машины. Поскольку генератор механически отделен от промышленной частоты, частоту вращения турбины можно изменять. Это приводит к повышению эффективности МГТУ в области частичных нагрузок.

В данной работе будет рассмотрены характеристики гибких МГТУ с параллельным блоком утилизации теплоты и использованием местных климатических ресурсов холода на частичных нагрузках при различных способах нагружения.

Базовые схемы МГТУ, работающих на органическом топливе

Микрогазотурбинные двигатели (МГТД) находят применение как для энергообеспечения локальных

объектов, так и стационарных, технологических и транспортных подводных и надводных объектов. За основу базовой схемы МГТУ принят МГТД простого цикла (см. рис. 2), который можно усложнить с целью увеличения КПД. При этом ГТД простого цикла является одновальным с блокированной турбиной для привода электрогенератора.

Усложнение ГТД простого цикла (ПЦ) осуществляется за счет:

- регенерации теплоты выхлопных газов в рабочем цикле двигателя;
- применения турбины перерасширения рабочего тела за силовой турбиной [7-10] с целью повышения мощности ГТД;
- применения комбинации предыдущих методов.

На рис. 3 изображена схема МГТУ с регенерацией теплоты (ПЦ+Р), в которой по отношению к схеме

МГТУ простого цикла добавлен теплообменник-регенератор для подогрева рабочего тела перед камерой сгорания за счет теплоты выхлопных газов двигателя, что позволяет повысить КПД самого двигателя.

На рис. 4 изображена схема микрогазотурбинной установки (МГТУ) с турбиной перерасширения. Турбина перерасширения, приводящая дожимающий компрессор (ДК) с охладителем газа (ОГ1) между ними, который выполняет роль котла-утилизатора, образует турбокомпрессорный утилизатор (ТКУ). Посредством применения в рабочем цикле перерасширения рабочих газов за силовой турбиной увеличивается мощность двигателя при том же расходе топлива и, следовательно, повышается КПД двигателя.

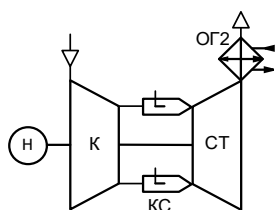


Рис. 2. Схема когенерационной МГТУ простого цикла (ПЦ): К – компрессор; КС – камера сгорания; СТ – силовая турбина; ОГ2 – охладитель газов; Н – нагрузка

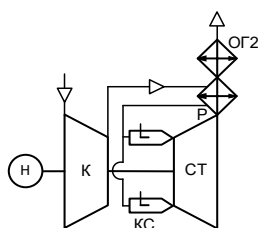


Рис. 3. Схема когенерационной МГТУ цикла с регенерацией (ПЦ+Р): Р – регенератор; остальные обозначения как на рис. 1

На рисунке 3 изображена схема микрогазотурбинной установки (МГТУ) с турбиной перерасширения. Турбина перерасширения, приводящая дожимающий компрессор (ДК) с охладителем газа (ОГ1) между ними, который выполняет роль котла-утилизатора, образует турбокомпрессорный утилизатор (ТКУ). Посредством применения в рабочем цикле перерасширения рабочих газов за силовой турбиной увеличивается мощность двигателя при том же расходе топлива и, следовательно, повышается КПД двигателя.

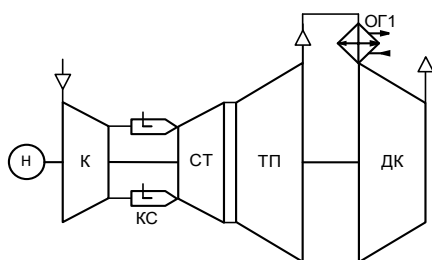


Рис. 4. Схема МГТУ с турбиной перерасширения (ПЦ+ТКУ): ТП – турбина; ОГ1 – охладитель газов; ДК – дожимающий компрессор; остальные обозначения как на рис. 1

Повышение КПД МГТД возможно также за счет глубокой утилизации теплоты выхлопных газов двигателя путем преобразования части ее в механическую работу. Такую задачу возможно решить за счет комбинации двух способов повышения экономичности МГТД, а именно, за силовой турбиной МГТД установить турбокомпрессорный утилизатор, а регенератор разместить между турбиной перерасширения и дожимающим компрессором.

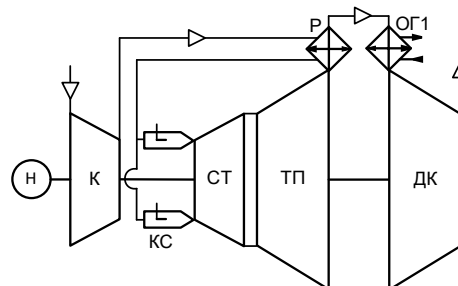


Рис. 5. Схема МГТУ с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты (ПЦ+ТКУ+Р): остальные обозначения как на рис. 1-3

На рис. 5 изображена схема МГТД с ТКУ и регенерацией теплоты. Охладитель газа ОГ1 обеспечивает понижение температуры газа перед ДК с целью снижения в нем работы сжатия, а также выполняет функцию котла-утилизатора для обеспечения локального объекта теплотой.

Методика и результаты исследования характеристик базовых МГТУ на номинальном режиме

Исследование характеристик рабочих циклов МГТУ при работе на номинальном режиме производилось с использованием физико-математических моделей и программного обеспечения, ранее опробованного при анализе параметров ГТУ, приведенных в работе [7-9].

В настоящее время в микрогазотурбинной технике достигнуты значительные успехи в области повышения эффективности ее элементов [11, 12]. В МГТУ необходимо учитывать конструктивные факторы, влияющие на аэродинамические характеристики компрессоров и турбин [11-14]. Так политропный КПД центростремительного компрессора находится в пределах $\eta_k = 80...82\%$, радиально-осевой турбины $\eta_m = 85...86,5\%$, а адиабатный КПД диагональных лопаточных машин $88...90\%$. В настоящее время применение доступных сплавов ЖС36 и ЖС40 позволяет иметь температуру газа перед турбиной до 1373 К включительно [15], при этом турбинная ступень высокого давления может быть неохлаждаемой. Для МГТУ характерно наличие теплообменных аппаратов, которые должны обеспечивать требуемые параметры рабочего тела в цикле, но при этом иметь оптимальные потери давления и, соответственно, габаритные размеры для МГТУ. Так, при применении регенератора, габариты которого существенно зависят от конструкции теплообменной матрицы, ее плотности и площади поверхности теплопередачи, для микротурбины оптимальная степень регенерации зависит от гидравлического сопротивления регенератора и давления рабочей среды по каждой

из теплообменивающих сторон [16]. Большинство мировых производителей МГТД («Микрогазотурбинные технологии», «Elliott», «Turbec», «Ingersoll R») используют степень

регенерации 0,9 [17, 18].

Для моделирования установок, изображенных на рисунках 2-5, были приняты параметры, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Параметры МГТУ

Наименование параметра	Ед. изм.	Численное значение
Политропный КПД турбины	–	0,865
Политропный КПД турбины компрессора	–	0,85
Политропный КПД компрессора	–	0,82
Политропный КПД второй ступени компрессора	–	0,8
Адиабатный КПД турбины перерасширения ¹	–	0,9
Адиабатный КПД дожимающего компрессора ²	–	0,88
КПД камеры сгорания	–	0,99
КПД электрогенератора	–	0,96
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны газа для ПЦ+Р ³	–	$\varepsilon_e = \frac{1-r}{2c_e r} \left(\sqrt{1+4c_e \frac{r}{1-r}} - 1 \right)$
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны газа для ПЦ+ТКУ+Р ³	–	$\varepsilon_e = \frac{1}{2c_e (\varepsilon_{oe1} \pi_{dk})^2} \frac{1-r}{r} \left(\sqrt{1+4c_e (\varepsilon_{oe1} \pi_{dk})^2 \frac{r}{1-r}} - 1 \right)$
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны воздуха ³	–	$\varepsilon_e = 1 - \frac{c_e}{\pi_k^2} \frac{r}{1-r}$
Коэффициент восстановления давления на входе в установку, ε_{ex}	–	0,96
Коэффициент восстановления давления в промежуточном охладителе воздуха, ε_{oe}	–	0,94
Коэффициент восстановления давления в КС, ε_{kc}	–	0,96
Коэффициент восстановления давления на выходе из установки, $\varepsilon_{вых}$	–	0,97
Коэффициент восстановления давления охладителей газа (ОГ1 и ОГ2), $\varepsilon_{oe1}, \varepsilon_{oe2}$	–	0,96
Температура газов на выходе из ОГ1 и ОГ2	К	323
Температура окружающего воздуха	К	288
Влажность окружающего воздуха	%	60
Примечания		
1, 2 – более высокие параметры компрессора и турбины связаны с масштабным эффектом в вакуумном цикле, поскольку давление рабочего тела за турбиной ниже атмосферного примерно в 2 раза, то соответственно во столько же раз размеры проточных частей компрессора и турбины больше, чем у компрессора и турбины в обычном цикле.		
3 – коэффициенты c_e и c_e определялись из параметров существующих прототипов [8].		

Кроме того, для МГТУ были приняты следующие ограничения по параметрам:

- максимальная степень регенерации – 0,9 (для обеспечения приемлемых температур перед регенератором со стороны газов);
- максимальная степень сжатия в одной ступени центробежного компрессора – 12 [18];
- максимальная степень сжатия в компрессоре ТКУ – 3,5 (для снижения массогабаритных показателей ОГ1).
- максимальная степень расширения в одной ступени турбины – 5 (радиально-осевая турбина) и 6 (центробежная турбина).

Результаты исследования характеристик базовых МГТУ

Анализ характеристик циклов МГТУ производился при изменении степени повышения давления π_k в компрессоре двигателя, дожимающем компрессоре π_{dk} , степени регенерации σ и прочих равных фиксированных параметрах, характерных для микрогазотурбинных установок. Результаты такой оптимизации МГТУ, работающих по схемам, изображенным на рисунках 2-5 и исходных данных, приведенных в таблице 1 при максимальной температуре цикла $T_3 = 1373$ К, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты оптимизации когенерационных МГТУ при $T_3 = 1373$ К

Наименование параметра	Ед. изм.	ПЦ	ПЦ+Р	ПЦ+ТКУ	ПЦ+ТКУ+Р
Эффективный КПД МГТУ	%	27,2	39,0	35,6	40,6
Температура газов на входе в охладитель газов	К	837	551	628	522
Оптимальная степень повышения давления в компрессоре	–	12	4,8	12	4,1
Оптимальная степень повышения давления в ДК	–	–	–	3,5	1,75
Оптимальная степень регенерации	–	–	0,9	–	0,9
Удельная мощность на валу силовой турбины	кДж/кг	228	188	297	236
Удельная тепловая мощность	кДж/кг	544	232	316	204
КПД теплотехнический	%	91	86	73	76

Результаты исследования характеристик комбинированных МГТУ

Для моделирования комбинированных установок были приняты параметры установок ОЦР, представленные в табл. 3. В качестве парогенераторов использованы прямоточные котлы основными преимуществами которых являются:

компактность, быстрое включение в работу, малое время нагрева рабочего тела и переход с режима на режим. Это очень важно, т.к. дает возможность регулирования производительности путем включения / отключения установки ОЦР в составе комбинированной МГТУ.

Таблица 3

Параметры установок ОЦР на номинальном режиме

№	Наименование параметра	Ед. изм.	Численное значение
1.	Адиабатный КПД турбины	–	0,82
2.	КПД насоса	–	0,78
3.	Коэффициент восстановления давления в парогенераторе	–	0,92
4.	Коэффициент восстановления давления в конденсаторе	–	0,96
5.	Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике	–	0,96
6.	Степень регенерации	–	0,9
7.	Минимальный температурный напор на выходе из испарительного пучка, ΔT_2	К	15
8.	Температура конденсации	К	$T_a + 25$
9.	Температурный напор между теплоносителем и перегретым паром на выходе из пароперегревателя, ΔT_1	К	50
10.	Расход теплоносителя	кг/с	≈ 1
11.	Кратность циркуляции рабочего тела	–	1

Свойства рабочих тел для установок ОЦР взяты в [19] (см. табл. 4).

Таблица 4

Некоторые свойства рабочих тел для установок ОЦР

Обозначение рабочего тела	Молекулярный вес	Критическое давление, МПа	Критическая температура, К	Температура разложения, К
R-717 (аммиак)	17,03	11,33	405,4	924
R-718 (вода)	18	22,06	647,3	2470
R-123	152,93	3,66	456,83	899
R-1233zd	130,5	3,57	438,75	824
R-134a	102	4,06	374,23	682
R-245fa	134,05	3,64	427,2	659

Из представленных в табл. 4 рабочих тел только аммиак и R-134a подходят для работы в установках ОЦР в климатических условиях портов сибирского региона Северного морского пути (см. рис. 6) ввиду низкой температуры конденсации. В работах [20, 21] показано, что использование «сухих» рабочих тел целесообразно в установках ОЦР с регенерацией, а «влажных» – в установках ОЦР без регенерации. Поэтому для R-717 и R-134a будет использоваться установка ОЦР без регенерации.

Температура окружающей среды и относительная влажность [22] для порта Игарка (см. рис. 6) определялись по формулам:

$$T_a = -26,1 - 0,297n - 1,46n^2 + 1,16n^3 - 0,164n^4 + 0,0065n^5, ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

$$\varphi = 0,86 - 7,05 \times 10^{-3} T_a - 4 \times 10^{-4} T_a^2 - 1,57 \times 10^{-5} T_a^3 - 2,34 \times 10^{-7} T_a^4, \quad (2)$$

где n – номер текущего месяца.

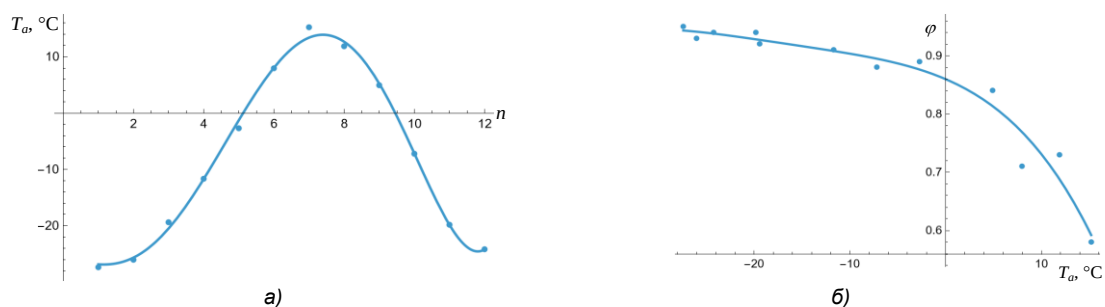


Рис. 6. Среднемесячные температура и относительная влажность окружающей среды порта Игарка: а) зависимость температуры окружающей среды от календарного месяца; б) зависимость относительной влажности окружающей среды от температуры

Схемы комбинированных микрогазотурбинных установок, использующие MPX

Схемы гибких комбинированных микрогазотурбинных установок с параллельным блоком утилизации теплоты и использованием местных климатических ресурсов холода на базе приведенных выше (см. рис. 2-5) и установок ОЦР с дополнительной турбиной приведены на рис. 7-10.

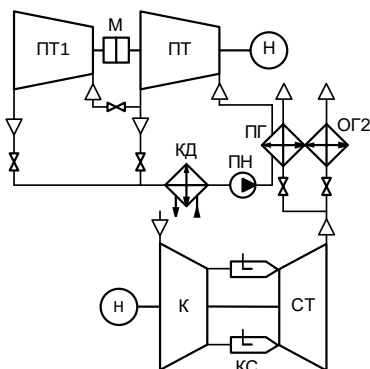


Рис. 7. Схема комбинированной МГТУ на базе ПЦ: ПТ – паровая турбина; ПТ1 – дополнительная паровая турбина; КД – конденсатор; ПН – питательный насос; ПГ – парогенератор; М – разъемная муфта; остальные обозначения как на рис. 2

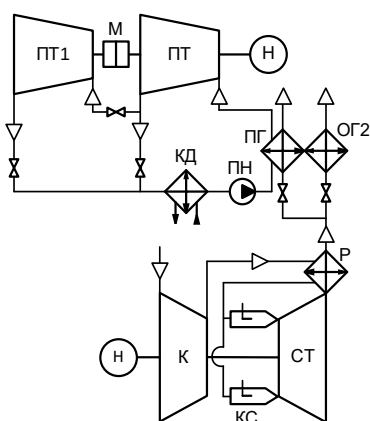


Рис. 8. Схема комбинированной МГТУ на базе ПЦ+Р:
остальные обозначения как на рис. 3 и 7

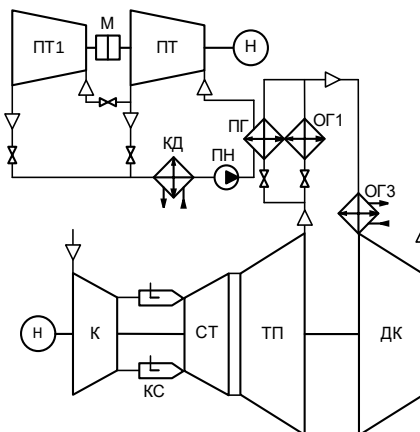


Рис. 9. Схема комбинированной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ:
остальные обозначения как на рис. 4 и 6

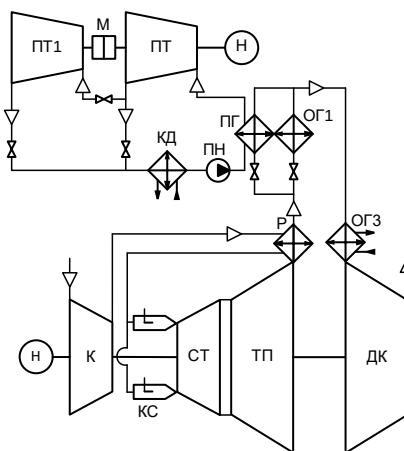


Рис. 10. Схема комбинированной МГТУ на базе (ПЦ+ТКУ+Р): остальные обозначения как на рис. 5 и 7

Методика и исследования характеристик комбинированных МГТУ, использующих МРХ

Исследование характеристик рабочих циклов МГТД производилось с использованием физико-математических моделей и программного обеспечения, ранее опробованного при анализе параметров в МГТУ, приведенных в работе [7], а характеристик установок ОЦР на моделях, использованных в [20]. Анализ характеристик циклов МГТД на частичных нагрузках производился на винтовом и изотермическом режимах с блокированной силовой турбиной и свободным ТКУ согласно методикам, предложенным в работах [23, 24] и опробованных, например, в работе [25].

Установки, изображенные на рис. 7-10, были исследованы при стандартных условиях в работе [3]. Однако, реальные климатические условия вызывают серьезные колебания базовых параметров работы комбинированных МГТУ, как на собственно МГТД, так и на установку ОЦР. Влияние температуры окружающей среды на эффективность ГТД исследовано в работе [26, 27]. Влияние температуры окружающей среды на эффективность ОЦР в составе комбинированной установки обусловлено изменчивостью температуры выхлопных газов, которые являются источником теплоты для ОЦР. Кроме того, в работах [4, 5] предложен способ использования сезонных колебаний температуры окружающей среды для повышения эффективности

работы установок ОЦР, заключающийся в том, что предлагается установить последовательно по ходу рабочего тела к основной турбине как минимум одну дополнительную («сезонную») турбину, которая включается в работу через разъединительную муфту по достижении температуры конденсации, зависящей от температуры окружающей среды, достаточной для обеспечения оптимальных параметров эффективности и основной и дополнительной турбин. В работе [28] было рассмотрено влияние температуры и влажности окружающей среды на эффективность комбинированных МГТУ. Некоторые результаты при изотермическом способе регулирования нагрузки представлены на рис. 11, а при винтовом – на рис. 12.

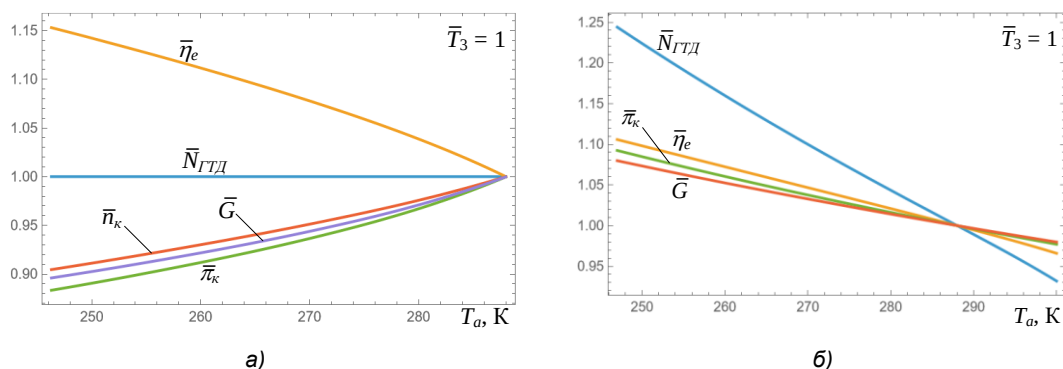


Рис. 11. Зависимость относительных параметров от температуры окружающего воздуха: а) МГТД на базе ПЦ+Р при постоянной мощности и $T_3 = \text{const}$; б) МГТД на базе ПЦ+Р при $T_3 = \text{const}$

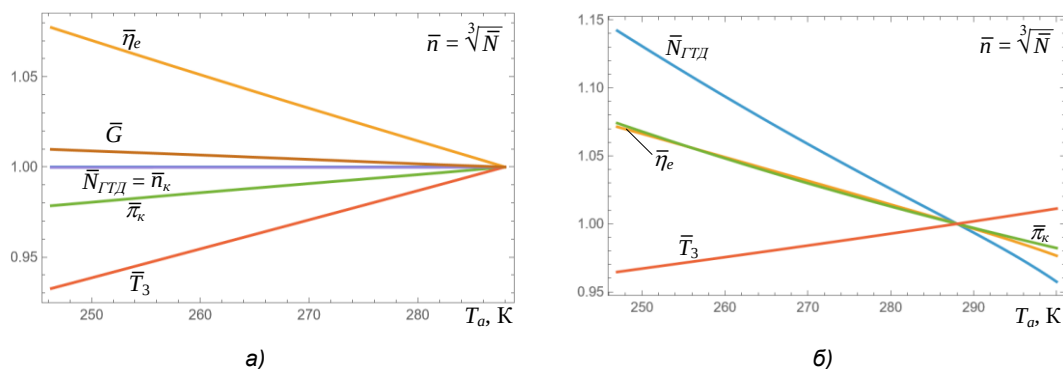


Рис. 12. Зависимость относительных параметров от температуры окружающего воздуха: а) МГТД на базе ПЦ+Р при постоянной мощности и винтовом способе регулирования; б) МГТД на базе ПЦ+Р при винтовом способе регулирования

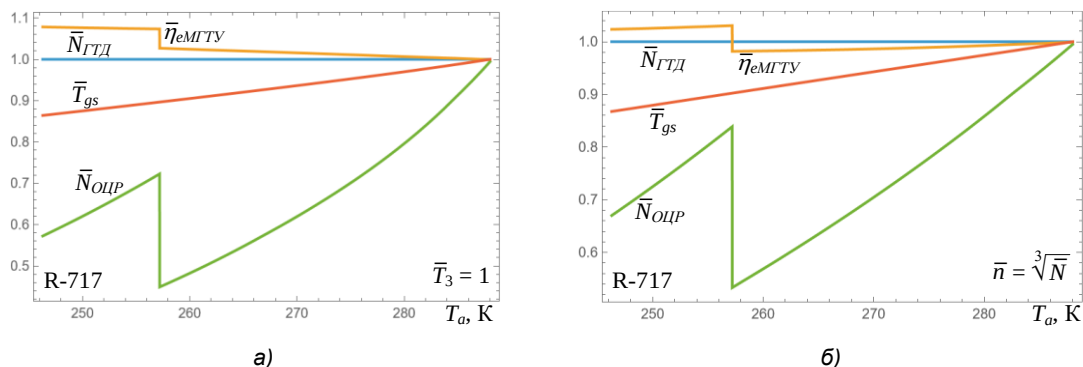


Рис. 13. Зависимость относительных параметров комбинированной МГТУ на базе ПЦ+Р и установки ОЦР с R-717 от температуры окружающего воздуха: а) изотермический способ регулирования; б) винтовой способ регулирования

Результаты исследования характеристик комбинированных МГТУ, использующих МРХ

Результаты исследования комбинированных МГТУ на базе МГТД ПЦ и ОЦР без регенерации с аммиаком в качестве рабочего тела (см. рис.6) изображены на рис.14.

Температура окружающей среды, при которой целесообразно запускать дополнительную турбину определяется при максимальной годовой выработке установки ОЦР (см. рис.14а) на примере комбинированной МГТУ на базе ПЦ. Годовая выработка установки ОЦР определяется зависимостью:

$$P = 30,4 \cdot 24 \cdot 3600 \sum_{i=1}^{12} (N_{ti} + k_{ti} N_{ti,доп}), \quad (3)$$

где P – годовая выработка энергетической установки ОЦР, кДж; N_{ti} – мощность основной турбины для i -го месяца, кВт; $N_{ti,доп}$ – мощность

дополнительной турбины для i -го месяца, кВт; k_{ti} – коэффициент времени работы дополнительной турбины для i -го месяца.

Из рис.14б видно, что при $T_3 = \text{const}$ дополнительная турбина работает примерно 5 месяцев в году, при этом наблюдается существенный рост КПД комбинированной МГТУ (примерно на 4,4 %). Стоит отметить, что среднегодовой КПД комбинированной МГТУ с одной турбиной в составе установки ОЦР равен 40,3 %, а с дополнительной – 42,6 %, что дает относительный прирост эффективности в 5,8 %. Для приводных машин (при ВСП) регулирование осуществляется за счет снижения температуры T_3 поэтому эффективность МГТУ при снижении T_a будет ниже из-за уменьшения температуры выхлопных газов МГТД. Это видно по загибу линии Б1 вниз относительно оси абсцисс (см. рис.14б) при понижении T_a .

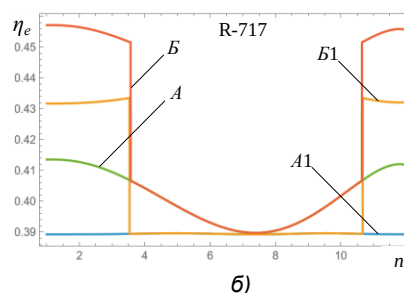
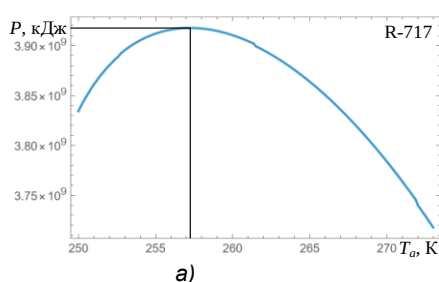


Рис. 14. Зависимость параметров комбинированной МГТУ на базе ПЦ и установкой ОЦР с дополнительной турбиной от параметров окружающей среды: а) зависимость годовой выработки установки ОЦР от температуры окружающего воздуха при $T_3 = \text{const}$; б) зависимость КПД МГТУ от сезона года и способа регулирования производительности, кривая А – без дополнительной турбины при $T_3 = \text{const}$, кривая Б – с дополнительной турбиной при $T_3 = \text{const}$, кривая А1 – без дополнительной турбины при ВСП, кривая Б1 – с дополнительной турбиной при ВСП

В связи с тем, что температура разложения хладагента R-134a (см. табл. 4) ниже температуры рабочего тела на выходе из МГТД (см. табл. 2), то исследование установки ОЦР с использованием этого вещества не производилось.

Результаты исследования комбинированных МГТУ на базе МГТД ПЦ+Р при различных способах регулирования и ОЦР без регенерации с аммиаком в качестве рабочего тела (см. рис.7) изображены на рис.15а, а с R-134a – на рис.15б.

Анализ рис.11 показывает, что использование аммиака в качестве рабочего тела установки ОЦР обеспечивает большую эффективность, чем использование R-134a. Из рисунков 15а и б видно, что дополнительная турбина работает, как и в

предыдущем случае, примерно 5 месяцев в году, при этом наблюдается рост КПД комбинированной МГТУ (примерно на 2,1 % и 2,7 % соответственно). При $T_3 = \text{const}$ среднегодовой КПД комбинированной МГТУ с одной турбиной в составе установки ОЦР с аммиаком равен 46,6 %, а с дополнительной – 47,8 %, что дает относительный прирост эффективности в 2,7 %. Для R-134a эти цифры будут 45,2 %, 46,7 % и 3,3 % соответственно. Также стоит отметить, что мощности установок ОЦР на R-134a существенно меньше, чем на аммиаке и влияние двигателя на эффективность МГТУ – существенно выше. Поэтому при ВСП эффективность МГТУ без дополнительной турбины растет (см. рис.15б, линия А1) при снижении T_a .

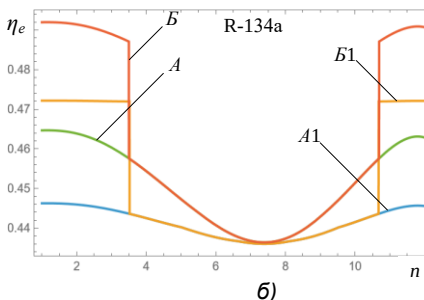
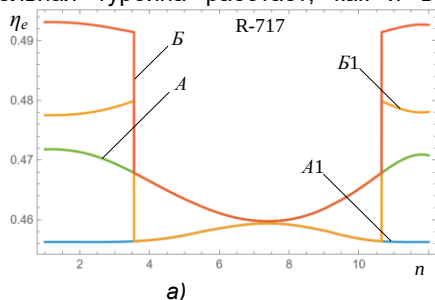


Рис. 15. Зависимость эффективности комбинированной МГТУ на базе ПЦ+Р и установкой ОЦР с дополнительной турбиной от сезона года и способа регулирования производительности, кривая А – без дополнительной турбины при $T_3 = \text{const}$, кривая Б – с дополнительной турбиной при $T_3 = \text{const}$, кривая А1 – без дополнительной турбины при ВСП, кривая Б1 – с дополнительной турбиной при ВСП: а) для аммиака; б) для R-134a

Результаты исследования комбинированных МГТУ на базе МГТД ПЦ+ТКУ при различных способах регулирования и ОЦР без регенерации с аммиаком в качестве рабочего тела (см. рис. 8) изображены на рис.12а, а с R-134а – на рис.12б.

Анализ рис.16а и б, как и в предыдущем случае, показывает, что использование аммиака в качестве рабочего тела установки ОЦР обеспечивает большую эффективность, чем использование R-134а. Из рисунков 16а и б видно, что дополнительная

турбина работает, как и в предыдущих случаях, примерно 5 месяцев в году, при этом наблюдается рост КПД комбинированной МГТУ (примерно на 2,8 % и 2,4 % соответственно). При $T_3 = \text{const}$ среднегодовой КПД комбинированной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ с одной турбиной в составе установки ОЦР с аммиаком равен 43,4 %, а с дополнительной – 44,7 %, что дает относительный прирост эффективности в 3,1 %. Для R-134а эти цифры будут 40,8 %, 42,0 % и 3,0 % соответственно.

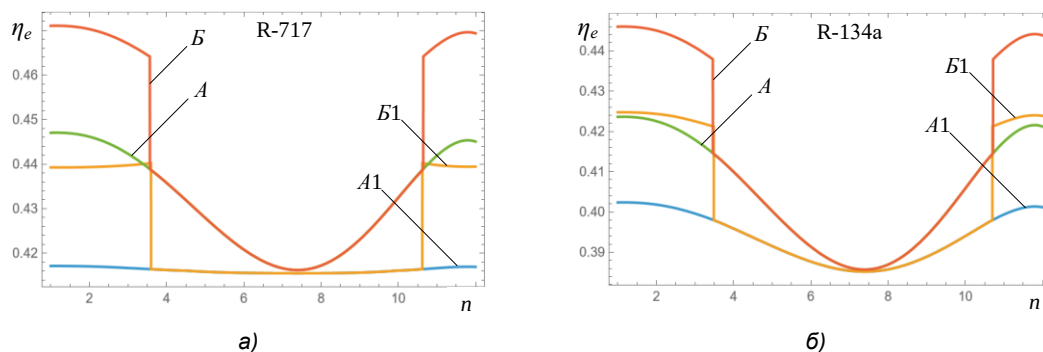


Рис. 16. Зависимость эффективности комбинированной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ и установкой ОЦР с дополнительной турбиной от сезона года и способа регулирования производительности, кривая А – без дополнительной турбины при $T_3 = \text{const}$, кривая Б – с дополнительной турбиной при $T_3 = \text{const}$, кривая А1 – без дополнительной турбины при ВСР, кривая Б1 – с дополнительной турбиной при ВСР: а) для аммиака; б) для R-134а

Результаты исследования комбинированных МГТУ на базе МГТД ПЦ+ТКУ+Р при различных способах регулирования и ОЦР без регенерации с аммиаком в качестве рабочего тела (см. рис.9) изображены на рис.16а, а с R-134а – на рис.16б.

Анализ рисунков 17а и б, как и в предыдущих случаях, показывает, что использование аммиака в качестве рабочего тела установки ОЦР обеспечивает большую эффективность, чем использование R-134а. Из рисунков 17а и б видно, что дополнительная турбина работает, как и в предыдущих случаях,

примерно 5 месяцев в году, при этом наблюдается рост КПД комбинированной МГТУ (примерно на 1,4 % и 2,0 % соответственно). При $T_3 = \text{const}$ среднегодовой КПД комбинированной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р с одной турбиной в составе установки ОЦР с аммиаком равен 46,3 %, а с дополнительной – 47,1 %, что дает относительный прирост эффективности в 1,7 %. Для R-134а эти цифры будут 45,7 %, 46,8 % и 2,4 % соответственно.

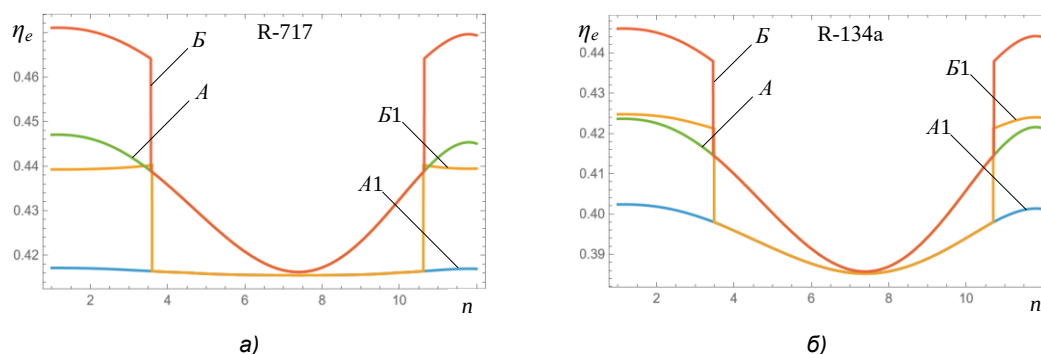


Рис. 17. Зависимость эффективности комбинированной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р и установкой ОЦР с дополнительной турбиной от сезона года и способа регулирования производительности, кривая А – без дополнительной турбины при $T_3 = \text{const}$, кривая Б – с дополнительной турбиной при $T_3 = \text{const}$, кривая А1 – без дополнительной турбины при ВСР, кривая Б1 – с дополнительной турбиной при ВСР: а) для аммиака; б) для R-134а

Результаты исследования комбинированных МГТУ на основе различных базовых конфигураций

МГТД и ОЦР без регенерации с аммиаком (NH_3) и R-134а в качестве рабочих тел сведены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

Результаты исследования комбинированных МГТУ различных конфигураций при $T_3 = \text{const}$

Наименование параметра	Ед. изм.	ПЦ	ПЦ+Р		ПЦ+ТКУ		ПЦ+ТКУ+Р	
		NH ₃	NH ₃	R-134a	NH ₃	R-134a	NH ₃	R-134a
Эффективный среднегодовой КПД МГТУ с установленной ПТ1	%	42,6	47,8	46,7	44,7	42,0	47,1	46,8
Эффективный среднегодовой КПД МГТУ без установленной ПТ1	%	40,3	46,6	45,2	43,4	40,8	46,3	45,7
Относительный прирост КПД от установки ПТ1	%	5,8	2,5	3,3	3,1	3,0	1,7	2,4
Оптимальная температура окружающей среды для запуска ПТ1	К	257,3	257,2	256,8	257,3	256,4	257,5	256,8
Максимальное давление рабочего тела в установке ОЦР	МПа	10	10	4	10	4	10	4

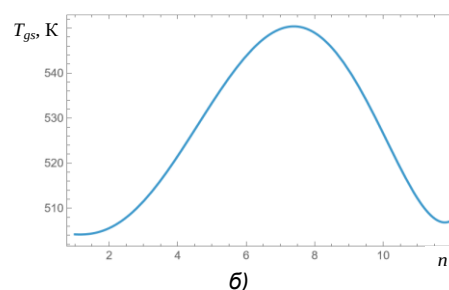
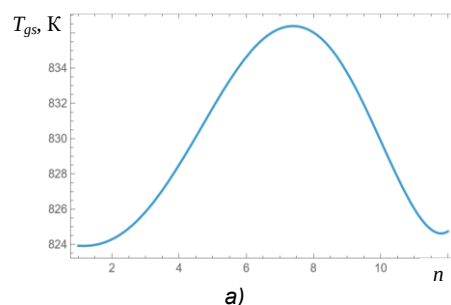
Таблица 6

Результаты исследования комбинированных МГТУ различных конфигураций при ВСП

Наименование параметра	Ед. изм.	ПЦ	ПЦ+Р		ПЦ+ТКУ		ПЦ+ТКУ+Р	
		NH ₃	NH ₃	R-134a	NH ₃	R-134a	NH ₃	R-134a
Эффективный среднегодовой КПД МГТУ с установленной ПТ1	%	41,1	46,8	45,8	42,8	40,6	46,0	45,7
Эффективный среднегодовой КПД МГТУ без установленной ПТ1	%	38,9	45,7	44,4	41,6	39,5	45,3	44,7
Относительный прирост КПД от установки ПТ1	%	5,5	2,4	3,2	2,8	2,9	1,6	2,3
Оптимальная температура окружающей среды для запуска ПТ1	К	257,0	257,2	256,9	257,6	256,6	257,7	256,9
Максимальное давление рабочего тела в установке ОЦР	МПа	10	10	4	10	4	10	4

Анализ табл. 5 и 6 показывает, что хладагент R-134a не может полностью использовать температурный потенциал газов конфигураций базовых МГТУ ввиду малой температуры разложения, кроме того, установки на аммиаке работают при значительно большем перепаде давлений поэтому эффективные КПД комбинированных МГТУ использующие установки ОЦР с R-134a в качестве рабочего тела меньше на 1...3 %, чем аналогичные, работающие на аммиаке. Также видно, что менее совершенные конфигурации базовых МГТУ получают от использования установок ОЦР большую прибавку к эффективности. Данные табл. 5 и 6 показывают, что наиболее эффективной конфигурацией базовой МГТУ для аммиака, является ПЦ+Р и хотя ее базовая конфигурация является не самой лучшей по эффективности (см. табл. 4), однако температурный режим, создаваемый на входе в установку ОЦР не позволяет лучше всех

использовать ее потенциал, а для R-134a наиболее эффективной конфигурацией базовой МГТУ является ПЦ+ТКУ+Р при $T_3 = \text{const}$ хотя разница и не существенна, а при ВСП – ПЦ+ТКУ+Р. Эта конфигурация МГТУ ввиду своей высокой базовой эффективности имеет самый малый прирост КПД от применения сезонной турбины. Комбинированная МГТУ на базе ПЦ имеет самый высокий температурный потенциал, создаваемый на входе в установку ОЦР – 824...836 К, что превышает температуру (T_{gs}), создаваемую комбинированной МГТУ ПЦ+ТКУ+Р – 480...520 К, однако низкий КПД конфигурации базовой МГТУ (ПЦ) не позволяет достигнуть высокого КПД комбинированному циклу. Характер температурного режима газов на входе в ОЦР сильно зависит от конфигурации базовой МГТУ (см. рис.18 а-е).



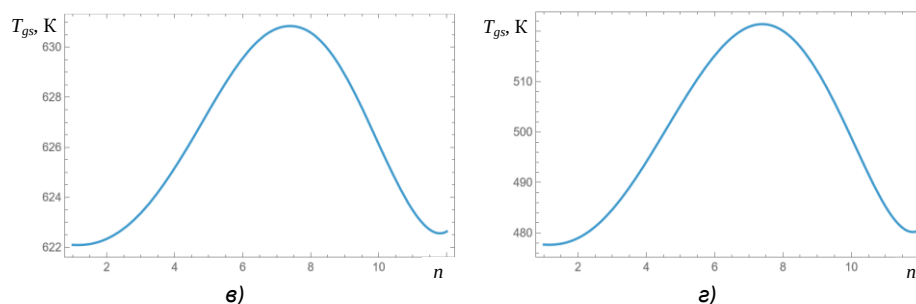


Рис. 18. Зависимость температуры на входе в ПГ ОЦР от времени года для МГТУ различных конфигураций: а) на базе ПЦ; б) на базе ПЦ+Р; в) на базе ПЦ+ТКУ; г) на базе ПЦ+ТКУ+Р

Конфигурации, содержащие в своем составе регенеративный теплообменник, имеют большой диапазон температур газов на входе в установку ОЦР в зависимости от сезонов года (см. рис.18 б и г) и повторяет аналогичную для температуры окружающей среды (см. рис.5а). Это очевидно, поскольку температура за регенератором МГТД однозначно зависит от температуры конца сжатия в компрессоре, которая, в свою очередь – от температуры окружающей среды. Поэтому для установок ОЦР в этих конфигурациях МГТУ применялись методики расчета на частичных нагрузках [27]. Для конфигураций, не имеющих в своем составе регенеративного теплообменника температурный режим на входе в установку ОЦР достаточно стабилен, потому что зависит только от максимальной температуры цикла, а небольшой разброс не более 8...12 К (см. рис.18 а и в) связан с изменением состава рабочего тела в связи с

сезонным изменением влажности окружающего воздуха и расхода топлива (см. рис.5б).

Также следует отметить, что оптимальная для запуска ПТ1 температура окружающей среды практически не зависит от базовой конфигурации МГТУ и рода рабочего тела ОЦР, а зависит от распределения температуры воздуха по сезонам года. Поэтому можно определять оптимальную температуру только для одной конфигурации и применять к остальным с приемлемой точностью, потому что максимумы на рисунках 10-16а достаточно пологие, чтобы ее обеспечить.

При необходимости МГТД работать в режиме постоянной мощности его относительные параметры будут зависеть от температуры окружающей среды как это представлено на рис.18а, где в качестве примера выбран двигатель на базе ПЦ+Р. Параметры МГТУ с ОЦР на R-717 представлены на рис.18б.

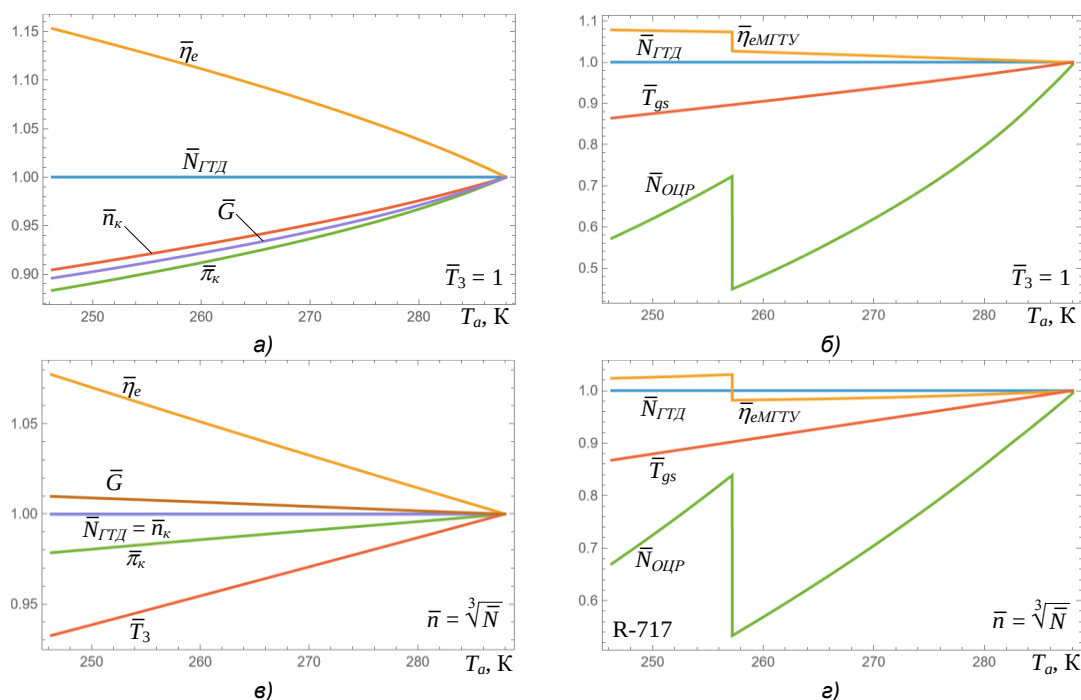


Рис. 19. Зависимость относительных параметров от температуры окружающего воздуха при изотермическом способе регулирования: а) МГТД на базе ПЦ+Р при $T_3 = \text{const}$; б) МГТУ на базе ПЦ+Р и установки ОЦР с R-717 при $T_3 = \text{const}$; в) МГТД на базе ПЦ+Р при BCP; г) МГТУ на базе ПЦ+Р и установки ОЦР с R-717 при BCP

На рисунках 19а-г относительные параметры определены по формулам:

– относительный расход наружного воздуха

$$\bar{G} = \frac{G}{G_0},$$

где G – расход рабочего тела через компрессор при текущей температуре окружающей среды, кг/с; G_0 – расход рабочего тела через компрессор при стандартных условиях, кг/с;

– относительная степень повышения давления в компрессоре

$$\bar{\pi}_k = \frac{\pi_k}{\pi_{k0}},$$

где π_k – степень повышения давления в компрессоре при текущей температуре окружающего воздуха; π_{k0} – степень повышения давления в компрессоре при стандартных условиях;

– относительная мощность ГТД

$$\bar{N}_{ГТД} = \frac{N_{ГТД}}{N_{ГТД0}},$$

где $N_{ГТД}$ – удельная (на единицу расхода воздуха) мощность МГТД при текущей температуре окружающего воздуха, кДж/кг; $N_{ГТД0}$ – удельная мощность МГТД на номинальном режиме при стандартных условиях, кДж/кг;

– относительный КПД

$$\bar{\eta}_e = \frac{\eta_e}{\eta_{e0}},$$

где η_e – эффективный КПД МГТУ; η_{e0} – КПД МГТУ при стандартных условиях;

– относительные обороты компрессора

$$\bar{n}_k = \frac{n_k}{n_{k0}}$$

где n_k – обороты компрессора при текущей температуре окружающего воздуха, с⁻¹; n_{k0} – обороты компрессора при стандартных условиях, с⁻¹;

– относительный КПД МГТУ

$$\bar{\eta}_{eМГТУ} = \frac{\eta_{eМГТУ}}{\eta_{eМГТУ0}},$$

где $\eta_{eМГТУ}$ – эффективный КПД МГТУ при текущей температуре окружающего воздуха; $\eta_{eМГТУ0}$ – эффективный КПД МГТУ при стандартных условиях;

– относительная температура газов МГТД

$$\bar{T}_{gs} = \frac{T_{gs}}{T_{gs0}},$$

где T_{gs} – температура газов на выходе из МГТД при текущих условиях работы, К; T_{gs0} – температура газов на выходе из МГТД при стандартных условиях работы, К;

– относительная мощность установки ОЦР

$$\bar{N}_{ОЦР} = \frac{N_{ОЦР}}{N_{ОЦР0}},$$

где $N_{ОЦР}$ – удельная (на единицу расхода воздуха) мощность установки ОЦР МГТУ при текущей температуре окружающего воздуха, кДж/кг; $N_{ОЦР0}$ – удельная мощность установки ОЦР МГТУ на номинальном режиме при стандартных условиях, кДж/кг.

– относительная мощность комбинированной МГТУ

$$\bar{N} = \frac{N}{N_0} = \frac{N_{ГТДi} + N_{ti} + k_{ti} N_{ti,доп}}{N_{ГТД0} + N_{t0}},$$

где N – удельная (на единицу приведенного расхода воздуха – $G_{пр} = G\sqrt{T_a}/288$; G – физический расход воздуха, кг/с) мощность комбинированной МГТУ на номинальном режиме, кДж/кг; N_0 – удельная мощность комбинированной МГТУ на номинальном режиме при $g_{o2} = 0$, кДж/кг; $N_{ГТДi}$ – удельная мощность МГТД для i -го нагружения МГТУ, кДж/кг; $N_{ГТД0}$ – удельная мощность МГТД на номинальном режиме МГТУ, кДж/кг; N_{ti} – удельная мощность основной турбины для i -го нагружения МГТУ, кДж/кг; N_{t0} – удельная мощность основной турбины на номинальном режиме МГТУ, кДж/кг; $N_{ti,доп}$ – удельная мощность дополнительной турбины для i -го нагружения МГТУ, кДж/кг; k_{ti} – коэффициент времени работы дополнительной турбины для i -го нагружения МГТУ.

Рисунок 19 показывает, что в случае обеспечения постоянной мощности МГТД и изотермического способа регулирования при снижении температуры окружающего воздуха эффективность двигателя (см. рисунок 19а), возрастает, а другие параметры, отмеченные на рисунке, снижаются. В противном случае (см. рисунок 19б) мощность двигателя может возрасти до 25 % при незначительном относительном росте (порядка 10 %) π_k , η_e и G . Для винтового способа регулирования (см. рис. 12а) при снижении температуры окружающего воздуха характерно поддержание постоянной мощности при постоянном числе оборотов и некотором росте расхода воздуха и КПД, а также снижении π_k и T_3 . В случае отсутствия ограничений на мощность (см. рис. 12б) при снижении температуры окружающего воздуха наблюдается рост мощности (до 15 %), π_k и эффективности МГТД (до 7 %) и уменьшение T_3 .

Относительный прирост эффективности МГТУ (см. рисунок 13а) при поддержании $T_3 = \text{const}$ для режима постоянной мощности МГТД в период работы дополнительной турбины установки ОЦР в этом случае составляет около 8 %. При этом характерно снижение мощности установки ОЦР из-за с понижения температуры уходящих газов МГТД с уменьшением T_a . Для винтового способа регулирования ситуация качественно не меняется, однако в результате того, что эффективность двигателя растет при снижении T_a медленнее, чем при изотермическом, то и мощность установки ОЦР падает медленнее, а прирост ее мощности от подключения дополнительной турбины выше. Качественно ситуация, изображенная на рисунках 11-13 повторяется для всех базовых конфигураций МГТУ (см. рисунки 2-5).

Результаты исследования базовых МГТУ (см. рисунки 2-5) на частичных нагрузках при стандартных и пониженных температурных условиях представлены на рис. 20-23 при винтовом и изотермическом способах нагружения.

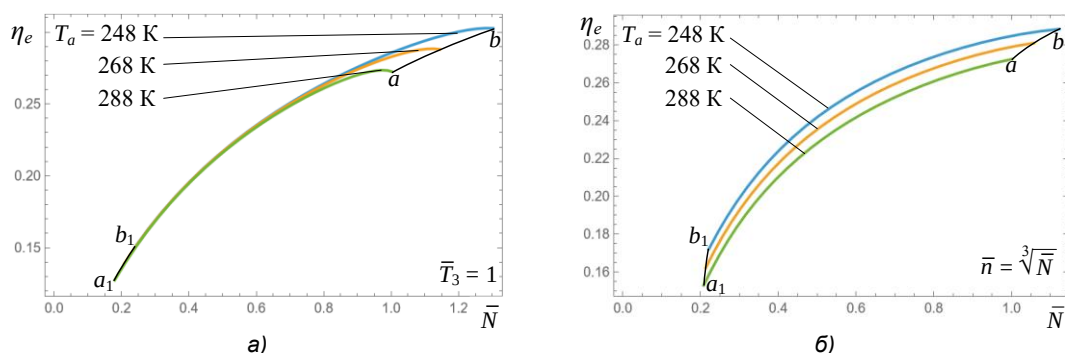


Рис. 20. Зависимость КПД МГТУ на базе ПЦ от относительной мощности и T_a при изотермическом (а) и винтовом (б) способах нагружения

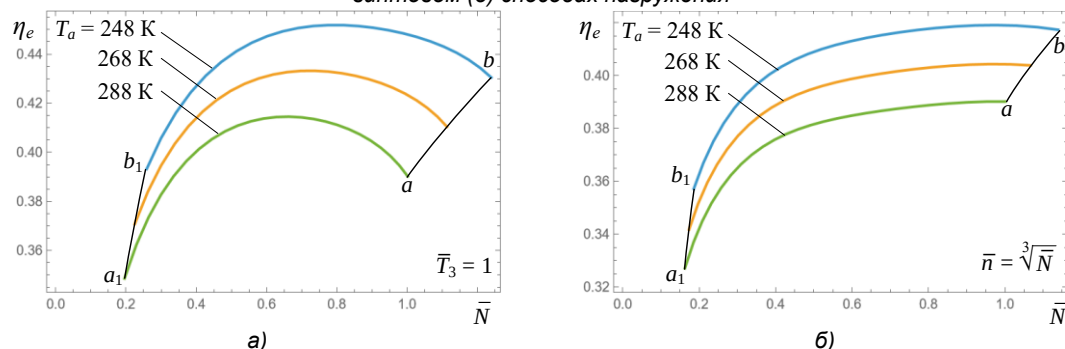


Рис. 21. Зависимость КПД МГТУ на базе ПЦ+Р от относительной мощности и T_a при изотермическом (а) и винтовом (б) способах нагружения

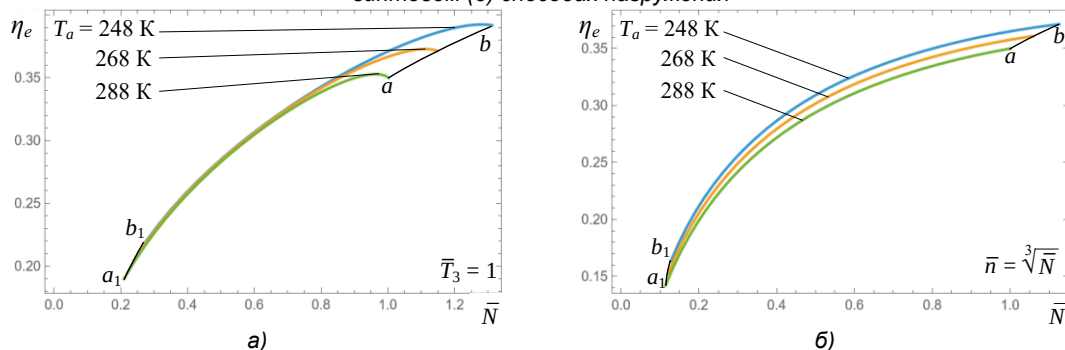


Рис. 22. Зависимость КПД МГТУ на базе ПЦ+ТКУ от относительной мощности и T_a при изотермическом (а) и винтовом (б) способах нагружения

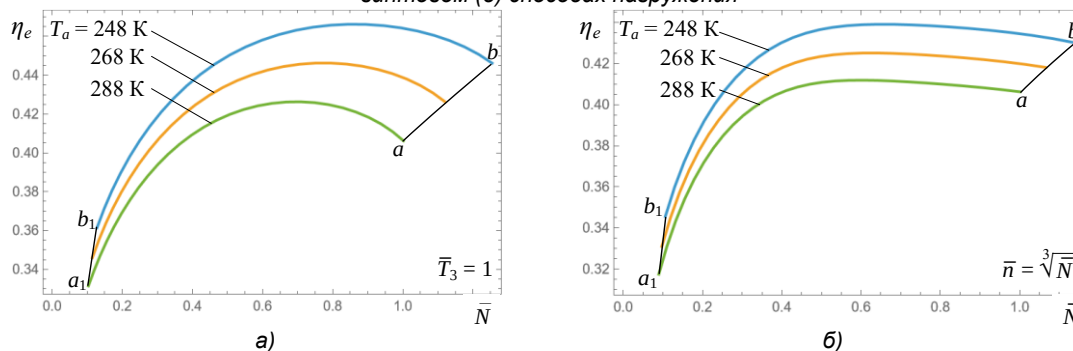
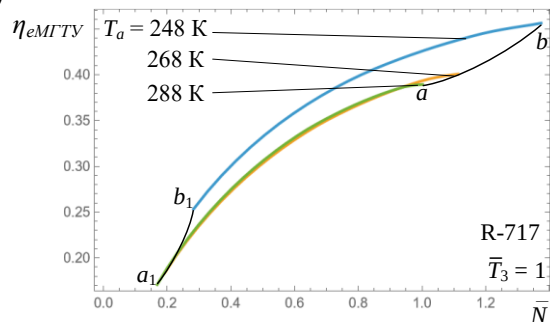


Рис. 23. Зависимость КПД МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р от относительной мощности и T_a при изотермическом (а) и винтовом (б) способах нагружения

Характер кривых эффективности МГТД, представленных на рисунках 20-23, подробно рассмотрен в работе [26]. Из рисунков видно, что зависимость эффективности от температуры на частичных нагрузках определяется в первую очередь наличием / отсутствием регенератора в схеме МГТД. Наличие регенератора в составе МГТД существенно влияет на эффективность при снижении T_a практически во всем доступном диапазоне

мощностей. Это объясняется тем, что с одной стороны при снижении T_a очевидно снижается и работа компрессора, что приводит к уменьшению расхода топлива, но с другой стороны снижается температура воздуха за компрессором, что приводит к росту расхода топлива. Наличие регенератора в составе МГТД при высокой степени регенерации практически нивелирует рост расхода топлива, связанный со снижением температуры воздуха за

компрессором. Это обеспечивает более высокий рост КПД машин с регенерацией по сравнению с другими. Кривые ab и a_1b_1 представляют собой линии постоянного физического расхода наружного воздуха.



Результаты исследования комбинированных МГТУ на базе МГТД ПЦ и ОЦР без регенерации с аммиаком в качестве рабочего тела (см. рисунок 7) на частичных нагрузках изображены на рисунке 18.

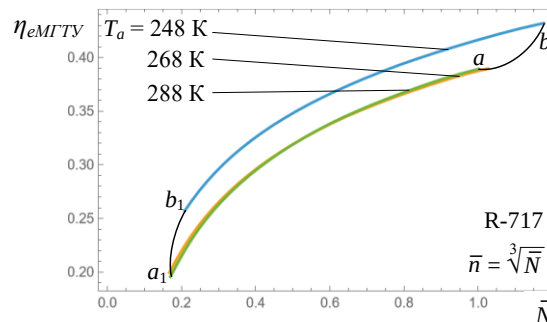


Рис. 24. Зависимость КПД МГТУ на базе ПЦ и установкой ОЦР с дополнительной турбиной от относительной мощности и T_a при изотермическом (а) и винтовом (б) способах нагружения

Анализ рис. 24 показывает, что характер зависимости МГТУ от нагрузки в целом определяется МГТД (см. рисунок 14). Большой разрыв между линиями $a-a_1$ и $b-b_1$ вызван подключением дополнительной турбины установки ОЦР. Поскольку регулирование при винтовом нагружении (у приводных машин) осуществляется за счет уменьшения температуры T_3 , то при номинальных параметрах двигателя температура газов на выходе самая большая и соответственно мощность

установки ОЦР больше, а эффективность МГТУ – выше. Этим объясняется изменившийся характер кривой ab для МГТУ на базе приводных машин (см. рис. 14б) по сравнению с изотермическим способом нагружения (см. рис. 14а).

Результаты исследования комбинированных МГТУ на базе МГТД ПЦ+Р и ОЦР без регенерации с аммиаком и хладагентом R-134a в качестве рабочих тел (см. рис. 8) на частичных нагрузках изображены на рис. 25.

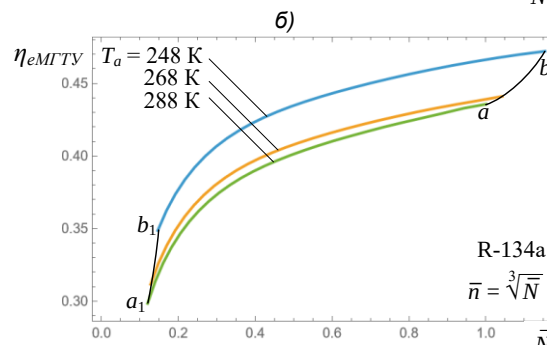
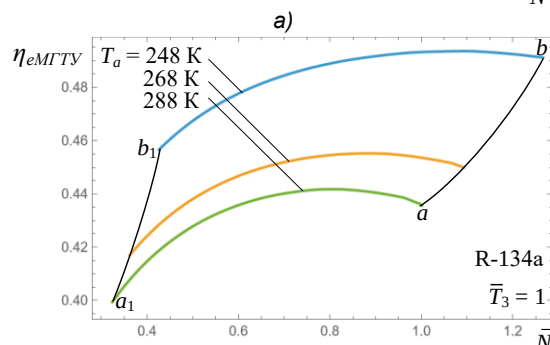
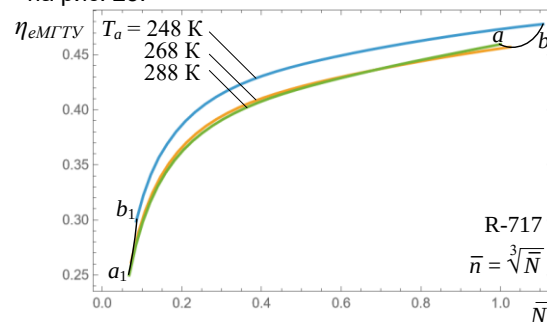
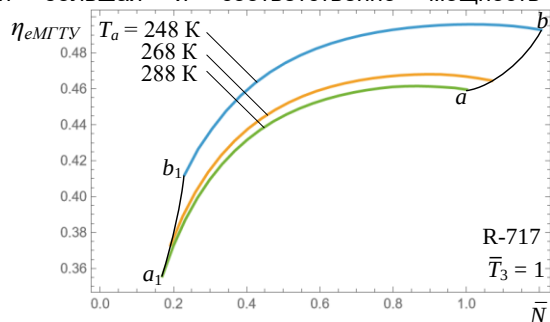


Рис. 25. Зависимость КПД МГТУ на базе ПЦ+Р и установкой ОЦР на аммиаке (а, б) и R-134a (в, г) с дополнительной турбиной от относительной мощности и T_a при изотермическом (а, в) и винтовом (б, г) способах нагружения

Анализ рис. 25 показывает, что ввиду наличия регенератора в составе двигателя (см. рис. 15) эффективность МГТУ существенно зависит от температуры окружающего воздуха особенно для установки с R-134a (см. рис. 25в). Это связано с тем, что мощности установок ОЦР на R-134a существенно меньше, чем на аммиаке и влияние двигателя на эффективность МГТУ – существенно выше. Этим же объясняется и различие в характере кривых ab для приводных машин (см. рис. 25б и г). При

изотермическом способе регулирования нагрузки работа МГТУ (см. рис. 25в) при относительных нагрузках менее 0,4 не имеет смысла поскольку мощность установки ОЦР становится очень малой из-за снижения температуры на выходе двигателя, поэтому поток выхлопных газов следует переключить на котел-утилизатор (ОГ2).

Результаты исследования комбинированных МГТУ на базе МГТД ПЦ+ТКУ и ОЦР без регенерации с аммиаком и хладагентом R-134a в качестве

рабочих тел (см. рис. 9) на частичных нагрузках изображены на рис. 26.

Анализ рис. 26 показывает, что рассуждения, примененные к установке на базе ПЦ применимы и установке ПЦ+ТКУ с поправкой на более высокую эффективность.

Результаты исследования комбинированных МГТУ на базе МГТД ПЦ+ТКУ+Р и ОЦР без регенерации с аммиаком и хладагентом R-134a в качестве рабочих тел (см. рис. 10) на частичных нагрузках изображены на рис. 27.

Анализ рис. 27 показывает, что рассуждения, примененные к установке на базе ПЦ+Р применимы и установке ПЦ+ТКУ+Р. Также можно отметить более высокое влияние температуры окружающего воздуха на эффективность МГТУ.

В предложенных выше схемах комбинированных МГТУ, использующих МРХ, с точки зрения гибкости эксплуатации можно выделить два режима:

- с разделяющимся потоком теплоты;
- с переключающимся потоком теплоты.

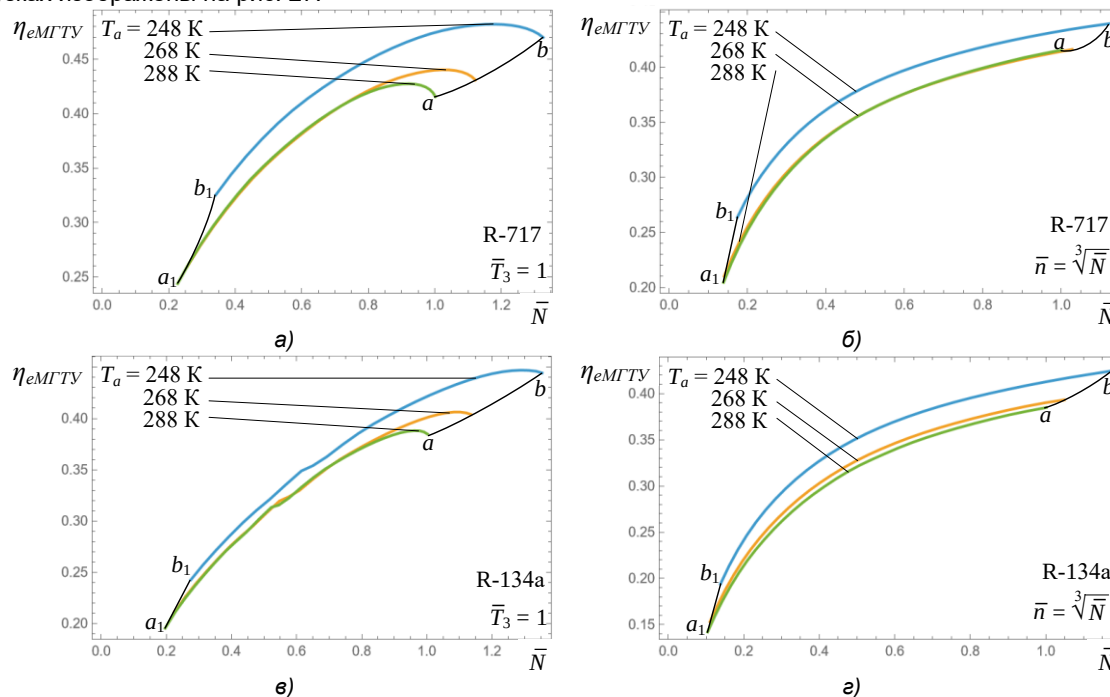


Рис. 26. Зависимость КПД МГТУ на базе ПЦ+ТКУ и установкой ОЦР на аммиаке (а, б) и R-134a (в, г) с дополнительной турбиной от относительной мощности и T_a при изотермическом (а, в) и винтовом (б, г) способах нагружения

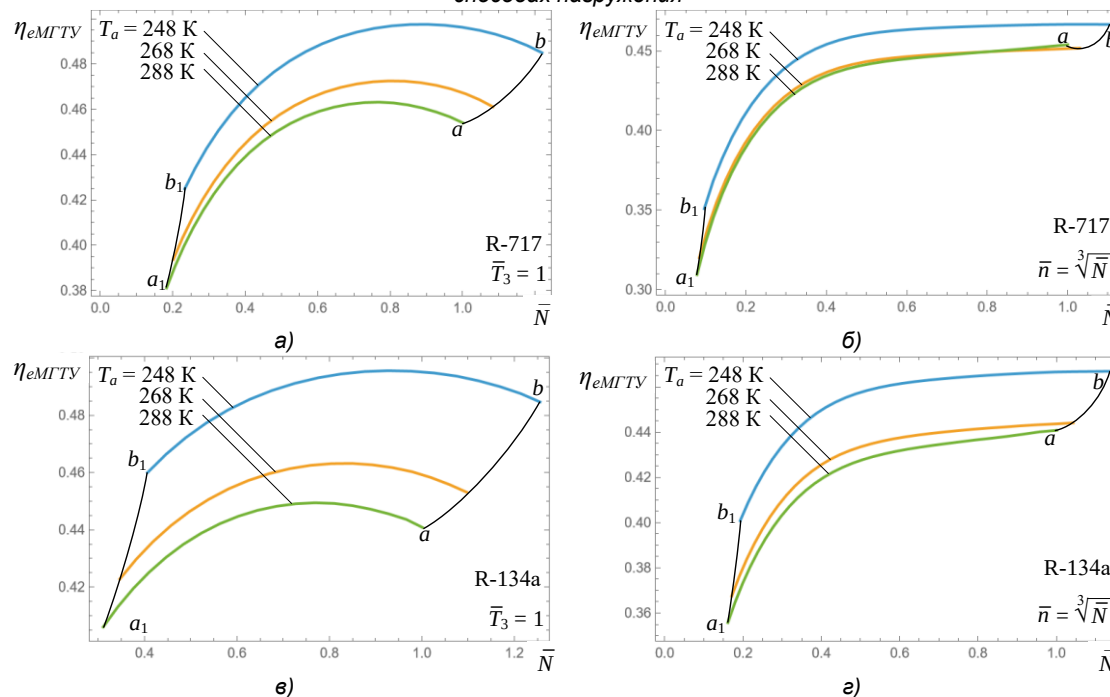


Рис. 27. Зависимость КПД МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р и установкой ОЦР на аммиаке (а, б) и R-134a (в, г) с дополнительной турбиной от относительной мощности и T_a при изотермическом (а, в) и винтовом (б, г) способах нагружения

Наиболее гибкими будет режим МГТУ с разделяющимся потоком теплоты, когда поток теплоты можно разделить между задачами теплоснабжения и дополнительного электроснабжения с помощью установки ОЦР. В этом случае МГТУ смогут отслеживать не только сезонные, но и суточные колебания нагрузки.

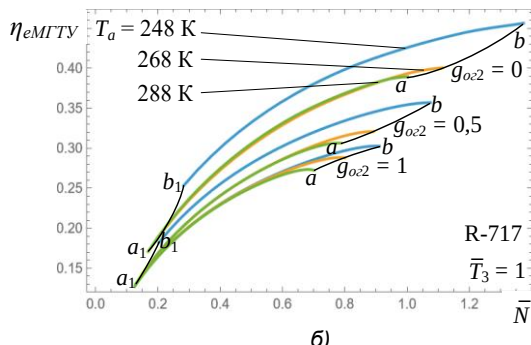
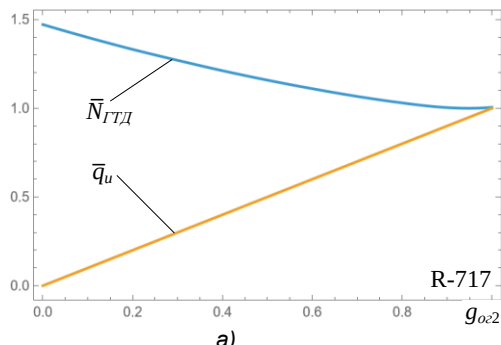


Рис. 28. Зависимость параметров комбинированной МГТУ на базе ПЦ и установки ОЦР с R-717: а) относительных среднегодовых теплоты, переданной на теплоснабжение и мощности от $g_{ог2}$; б) эффективного КПД на переменных режимах при различных значениях $g_{ог2}$

Для остальных установок режим с разделяющимся потоком теплоты целесообразно использовать на номинальном и близком к нему режимах.

На рис. 28 а и б относительная теплота, переданная на теплоснабжение через ОГ2, находится по формуле

$$\bar{Q} = \frac{Q}{Q_0}$$

где Q – теплота, переданная на теплоснабжение через ОГ2 или ОГ1 (зависит от схемы МГТД), кДж/кг; Q_0 – теплота, переданная на теплоснабжение через ОГ2 или ОГ1 на номинальном режиме при $g_{ог2} = 1$, кДж/кг.

Рис. 28 наглядно показывает, что с ростом $g_{ог2}$ снижается влияние установки ОЦР на эффективность комбинированной МГТУ, но возрастает количество теплоты, переданной на теплоснабжение объекта. Это позволяет гибко перераспределять энергию цикла в зависимости от текущих потребностей объекта в тепле и электричестве.

Режим с переключающимся потоком теплоты ввиду недостаточной гибкости целесообразно использовать установкой теплового бака аккумулятора, который можно наполнять теплом в ночной период при выключенной установке ОЦР, когда потребление электроэнергии снижается.

Заключение

Проведенные исследования показали:

1. Сезонные колебания температуры окружающего воздуха в сибирском регионе Северного морского пути оказывают существенное влияние на эффективность как когенерационных, так и комбинированных МГТУ, особенно на установки, содержащие регенератор теплоты в составе двигателя.

2. Наличие дополнительной турбины в составе установки ОЦР повышает эффективность комбинированных МГТУ в широком диапазоне нагрузок на различных режимах нагружения.

3. Использование аммиака в качестве рабочего тела установки ОЦР позволяет добиваться более высокой эффективности по сравнению хладагентом R-134a, и работать в более широком диапазоне нагрузок.

4. Для повышения гибкости комбинированных МГТУ можно использовать режимы эксплуатации с разделяющимся между установкой ОЦР и котлоутилизатором потоком теплоты. Наиболее целесообразной для этих задач является комбинированная установка на базе ПЦ, поскольку установка ОЦР имеет существенную долю мощности в комбинированной МГТУ и позволяет варьировать отпускаемую потребителю теплоту и электроэнергию в широком диапазоне как на номинальных, так и на переменных режимах при различных способах регулирования. Для остальных схем комбинированных МГТУ режим с разделяющимся потоком теплоты целесообразно использовать на номинальном и близком к нему режимах.

Литература

- Очеретяный В.А. Гибкие когенерационные технологии на базе энергетических газотурбинных установок / В.А. Очеретяный, В.Т. Матвеев, А.В. Дологлонян // Комиссия РАН по газовым турбинам, LXV научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин и парогазовых установок, 18-19 сентября 2018, С-Пб. С 93-101.
- Гамаюнов С.Н. Перспективные технологии распределенной энергетики в агробизнесе: монография / С.Н. Гамаюнов. Тверь: ООО «Издательство «Триада», 2011. 160 с.

3. Дологлонян, А. В. Термодинамические характеристики гибких комбинированных микрогазотурбинных установок для распределенной энергетики / А. В. Дологлонян, В. Т. Матвеев, А. Г. Клименко // Системы контроля окружающей среды. 2024. № 3(57). С. 99-114. DOI 10.33075/2220-5861-2024-3-99-114. EDN WNELZD.
4. Патент на изобретение 2762815 Российская Федерация, МПК F01K 25/10. Способ повышения эффективности энергетической установки органического цикла Ренкина с помощью использования климатического ресурса холода / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеев, И.Н. Стаценко, А.М. Олейников: заявитель и патентообладатель ФГБНУ «Институт природно-технических систем», – № 2021124594, заяв. 18.08.2021; опубл. 23.12.2021, Бюл. № 36.
5. Дологлонян А.В., Матвеев В.Т., Клименко А.Г. Исследование эффективности установок органического цикла Ренкина при использовании местных климатических ресурсов холода, Морские интеллектуальные технологии. 2025. N 2, часть 1. С. 145—153.
6. Матвеев В.Т. Глубокая утилизация теплоты в газотурбинных двигателях с турбиной перерасширения / В.Т. Матвеев // Промышленная теплотехника. – 1997. – Т. 19. – № 4-5. – С. 81-85.
7. Matviinko V. Variable regimes operation of cogenerative gas -turbine engines with overexpansion turbine/ V.Matviinko, V. Ocheretianiy // Procecoligs of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air 'GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.
8. Matviienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex / V. Matviienko, O. Andriets, V. Ochretianiy // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany.
9. Matviienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V/ Matviienko, V. Ocheretianiy // Procecoling of ASME Turbo Expo 2016: June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.
10. Diener OF, van der Spuy SJ, von Backström TW, Hildebrandt T. Multi-Disciplinary Optimization of a Mixed-Flow Compressor Impeller. ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 8: Microturbines, Turbochargers and Small Turbomachines; Steam Turbines ():V008T23A021. doi:10.1115/GT2016-57008.
11. Deng, Qing-Hua & Shao, Shuai & Fu, Lei & Luan, Hai-Feng. (2018). An Integrated Design and Optimization Approach for Radial Inflow Turbines – Part I: Automated Preliminary Design. Applied Sciences. 8. 2038. 10.3390/app8112038.
12. Vick, Michael & Young, Trent & Kelly, Matthew & Tuttle, Steven & Hinnant, Katherine. (2016). A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests. V008T23A030. 10.1115/GT2016-57780.
13. Арбеков А.Н. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок / А.Н. Арбеков, А.Ю. Бараксин, Э.А. Мнушин, В.Е и др. М. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 678 с.
14. Литейные жаропрочные сплавы и технология получения монокристаллических лопаток ГТД / Е.Н. Каблов, Н.Г. Орехов, В.Н. Толораия, И.М. Демонис // Технология легких сплавов. 2002. № 4. С. 100-105.
15. Дологлонян А.В. Оптимизация степени регенерации для циклов микрогазотурбинных установок / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2020. № 3 (341). С. 59-66.
16. M.J. Moore Micro-turbine generators // Professional Engineering. 2002. Printed in the USA. p.263.
17. Барсков, В. В. Выбор параметров и обоснование конструктивной схемы малогабаритной газотурбинной установки с независимым соотношением частот вращения роторов турбины и компрессора: специальность 05.04.12 «Турбомашины и комбинированные турбоустановки»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Барсков Виктор Валентинович. Санкт-Петербург, 2017. 22 с.
18. Дологлонян А.В. Оптимизация степени регенерации для циклов микрогазотурбинных установок / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2020. № 3 (341). С. 59-66.
19. Вукалович М.П. Термодинамика / М.П. Вукалович, И.И. Новиков. М.: Машиностроение, 1972. 672 с.
20. [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: каталог турбокомпрессоры Чехия CZ a.s. Turbo division (дата обращения 19.04.25).
21. [Электронный ресурс]. – 2019. – URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/> (дата обращения 31.05.19).
22. Дологлонян А.В. Выбор рабочего тела и оптимизация параметров органического цикла Ренкина / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2019. № 5 (337). С. 139-151.
23. Дологлонян А.В. Термодинамические характеристики комбинированных циклов микрогазотурбинных двигателей для распределенной энергетики / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2020. № 4-1 (342). С. 28-41.
24. [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ипарка/> (дата обращения 19.04.25).
25. A Novel Concept for Reducing Water Usage and Increasing Efficiency in Power Generation. Final Report U.S. Department of Energy. National Energy Technology Laboratory. Pittsburgh, PA. March 2004 DOE Award No.: DE-FG26-02NT41544.
26. Ревзин Б.С. Газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом. Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2002. 269 с.
27. Дологлонян А.В. Оценка эффективности установок органического цикла Ренкина на частичных нагрузках при работе на различных рабочих телах / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеев, А.Г. Клименко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2022. № 2 (352). С. 9-18.

References

1. Ocheretyanyj V.A. Gibkie kogeneracionnye tekhnologii na baze energeticheskikh gazoturbinnih ustanovok [Flexible cogeneration technologies based on gas turbine power plants]. V.A. Ocheretyanyj, V.T. Matveenko, A.V. Dologlonyan // Komissiya RAN po gazovym turbinam, LXV nauchno-tekhnicheskaya sessiya po problemam gazovyh turbin i parogazovyh ustanovok, 18-19 sentyabrya 2018, S-Pb. Pp 93-101.
2. Gamayunov S.N. Perspektivnye tekhnologii raspredelennoj energetiki v agrobiznese: monografiya [Promising distributed energy technologies in agribusiness] / S.N. Gamayunov. Tver': OOO «Izdatel'stvo «Triada», 2011. 160 p.
3. Dologlonyan, A. V. Termodinamicheskie harakteristiki gibkih kombinirovannyh mikrogazoturbinnih ustanovok dlya raspredelennoj energetiki [Thermodynamic characteristics of flexible combined microgas turbine plants for distributed energy]. A. V. Dologlonyan, V. T. Matveenko, A. G. Klimenko. Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy. 2024. № 3(57). S. 99-114. DOI 10.33075/2220-5861-2024-3-99-114. EDN WNELZD.
4. Patent na izobretenie 2762815 Rossijskaya Federaciya, MPK F01K 25/10. Sposob povysheniya effektivnosti energeticheskoy ustanovki organicheskogo cikla Renkina s pomoshch'yu ispol'zovaniya klimaticheskogo resursa holoda [Method for increasing the efficiency of a power plant of the organic rankine cycle using the climatic resource of cold]. A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko, I.N. Stacenko, A.M. Olejnikov: zayavitel' i patentoobladatel' FGBNU «Institut prirodno-tekhnicheskikh sistem», – № 2021124594, zayav. 18.08.2021; opubl. 23.12.2021, Byul. № 36.
5. Dologlonyan A.V., Matveenko V.T., Klimenko A.G. Issledovanie effektivnosti ustanovok organicheskogo cikla Renkina pri ispol'zovanii mestnyh klimaticheskikh resursov holoda [Study of organic Rankine cycle plants on partial loads using local climate cold resources]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2025. N 2, Part 1. 145—153.
6. Matveenko V.T. Glubokaya utilizatsiya teploty v gazoturbinnih dvigatelyah s turbinoj pererasshireniya [Deep heat recovery in gas turbine engines with an overexpansion turbine] / V.T. Matveenko // Promyshlennaya teplotekhnika. – 1997. – T. 19. – № 4-5. – Pp. 81-85.
7. Matvienko V. Variable regimes operation of cogenerative gas turbine engines with overexpansion turbine/ V.Matvienko, V. Ocheretianiy// Procecoligs of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air 'GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.
8. Matviienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex / V. Matviienko, O. Andriets, V. Ochretianij // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany.
9. Matviienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V/ Matviienko, V. Ocheretianiy // Procecoling of ASME Turbo Expo 2016: June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.
10. Diener OF, van der Spuy SJ, von Backström TW, Hildebrandt T. Multi-Disciplinary Optimization of a Mixed-Flow Compressor Impeller. ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 8: Microturbines, Turbochargers and Small Turbomachines; Steam Turbines: V008T23A021. doi:10.1115/GT2016-57008.
11. Deng, Qing-Hua & Shao, Shuai & Fu, Lei & Luan, Hai-Feng. (2018). An Integrated Design and Optimization Approach for Radial Inflow Turbines – Part I: Automated Preliminary Design. Applied Sciences. 8. 2038. 10.3390/app8112038.
12. Vick, Michael & Young, Trent & Kelly, Matthew & Tuttle, Steven & Hinnant, Katherine. (2016). A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests. V008T23A030. 10.1115/GT2016-57780.
13. Arbekov A.N. Teoriya i proektirovanie gazoturbinnih i kombinirovannyh ustanovok [Theory and design of gas turbine and combined cycle plants]. A.N. Arbekov, A.YU. Varaksin, E.A. Mnushin, V.E. i dr. M. Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, 2017. 678 p.
14. Litejnye zharoprochnye splavy i tekhnologiya polucheniya monokristallicheskikh lopatok GTD [Foundry heat-resistant alloys and technology for producing single-crystal gtp blades]. E.N. Kablov, N.G. Orekhov, V.N. Toloraiya, I.M. Demonis // Tekhnologiya legkih splavov. 2002. № 4. Pp. 100-105.
15. Dologlonyan A.V. Optimizatsiya stepeni regeneratsii dlya ciklov mikrogazoturbinnih ustanovok [Degree of regeneration optimization for cycles of microgas turbine plants]. A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko. Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2020. № 3 (341). Pp. 59-66.
16. M.J. Moore Micro-turbine generators // Professional Engineering. 2002. Printed in the USA. p.263.
17. Barskov, V. V. Vybory parametrov i obosnovanie konstruktivnoj skhemy malogabaritnoj gazoturbinnoy ustanovki s nezavisimym sootnosheniem chastot vrashcheniya rotorov turbiny i kompressora: special'nost' [Selection of parameters and justification of the design diagram of a small-sized gas turbine unit with an independent ratio of rotation frequencies of turbine and compressor rotors]. 05.04.12 «Turbomashiny i kombinirovannye turboustanki»: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Barskov Viktor Valentinovich. Sankt-Peterburg, 2017. 22 p.
18. Dologlonyan A.V. Optimizatsiya stepeni regeneratsii dlya ciklov mikrogazoturbinnih ustanovok [Optimization of the degree of regeneration for micro gas turbine cycles]. A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko. Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2020. № 3 (341). Pp. 59-66.
19. Vukalovich M.P. Termodinamika [Thermodynamics]. M.P. Vukalovich, I.I. Novikov. M.: Mashinostroenie, 1972. 672 p.
20. [Elektronnyj resurs]. – 2025. – URL: katalog turbokompressory CHekhiya ČZ a.s. Turbo division (data obrashcheniya 19.04.25).
21. [Elektronnyj resurs]. – 2019. – URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/> (data obrashcheniya 31.05.19).
22. Dologlonyan A.V. Vybory rabochego tela i optimizatsiya parametrov organicheskogo cikla Renkina [Selection of the working fluid and optimization of the parameters of the organic Rankine cycle]. A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko

- // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2019. № 5 (337). Pp. 139-151.
23. Dologlonyan A.V. Termodinamicheskie harakteristiki kombinirovannykh ciklov mikrogaзoturbinnnykh dvigatelej dlya raspredelennoj energetiki [Thermodynamic characteristics of combined cycle micro gas turbine engines for distributed energy]. A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko. Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2020. № 4-1 (342). Pp. 28-41.
24. [Elektronnyj resurs]. – 2025. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ilgarka/> (data obrashcheniya 19.04.25).
25. A Novel Concept for Reducing Water Usage and Increasing Efficiency in Power Generation. Final Report U.S. Department of Energy. National Energy Technology Laboratory. Pittsburgh, PA. March 2004 DOE Award No.: DE-FG26-02NT41544.
26. Revzin B.S. Gazoperekachivayushchie agregaty s gaзoturbinnym privodom [Gas pumping units with gas turbine drive]. Ekaterinburg, UGTU-UI, 2002. 269 p.
27. Dologlonyan A.V. Ocenka effektivnosti ustanovok organicheskogo cikla Renkina na chastichnykh nagruzkah pri rabote na razlichnykh rabochih telah [Evaluation of the efficiency of organic Rankine cycle plants at partial loads when operating on different working fluids]. A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko, A.G. Klimenko. Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2022. № 2 (352). Pp. 9-18.

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

Дологлонян Андрей Вартазарович, кандидат технических наук, доцент, ведущ. науч. сотр., зав. лабораторией экоэнергетики, Институт природно-технических систем Российской Федерации, г. Севастополь 299011, ул. Ленина, 11, e-mail: dologlonyan@mail.ru

Andrey V. Dologlonyan, Ph.D., assistant professor, Leading Researcher, Chief of Ecoenergetic Laboratory, Institute of nature and technical systems, Lenina, 11 St., Sevastopol, 299011, Russian Federation, e-mail: dologlonyan@mail.ru

Матвеенко Валерий Тимофеевич, доктор технических наук, профессор, гл. науч. сотр., Институт природно-технических систем Российской Федерации, г. Севастополь 299011, ул. Ленина, 11, e-mail: mvt3900@mail.ru

Valerii T. Matveenko, Dr. Sci., Professor, Chief Researcher, Institute of nature and technical systems, Lenina, 11 St., Sevastopol, 299011, Russian Federation, e-mail: mvt3900@mail.ru

Клименко Александр Георгиевич, ведущий инженер-исследователь, Институт природно-технических систем Российской Федерации, г. Севастополь 299011, ул. Ленина, 11, e-mail: kag195877@gmail.com

Alexander G. Klimenko, Leading Research Engineer, Institute of nature and technical systems, Lenina, 11 St., Sevastopol, 299011, Russian Federation, e-mail: kag195877@gmail.com

Владецкая Екатерина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Судовой энергетики и электрооборудования» Морского института имени вице-адмирала В.А. Корнилова - Филиала ФГБОУ ВО Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, г. Севастополь, ул. Героев Севастополя 11, корпус 8/22, e-mail: vladetski@gmail.com

Ekaterina A. Vladetskaya, Ph.D., assistant professor of the Department of Marine Power Engineering and Electrical Equipment of Vice Admiral Kornilov Maritime Institute – Sevastopol branch of FSFEI HE "ADMIRAL USHAKOV MARITIME STATE UNIVERSITY" vladetski@gmail.com, Sevastopol, 11 Geroev Sevastopol St., building 8/22, Russian Federation, e-mail: vladetski@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 05.09.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 12.01.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 10.02.2026.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Научная статья

УДК 621.396.969

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.016>

Определение угловых координат независимо движущихся группы объектов береговыми радиолокационными системами

Артюшенко В.М.¹ artuschenko@mail.ru, Самаров Е.К.² omega511@mail.ru,

¹Технологический университет им. А.А. Леонова (филиал МИИГАиК)

²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В практике радиотехнических измерений береговых радиолокационных систем особый интерес вызывает задача определения угловых координат независимо движущихся объектов, находящихся в пределах диаграммы направленности антенны. Измерять угловые координаты таких объектов нужно либо после разрешения объектов, то есть разделения сигналов, отраженных от группы объектов, либо совместно с ним. Наиболее часто применяют метод частотного разрешения, анализируя спектр отраженного сигнала. Однако частотное разрешение не всегда удовлетворяет предъявляемым требованиям к разрешению объектов, движущихся с одинаковой радиальной скоростью. Кроме того, для задачи измерения угловых координат желательно использовать результаты углового разрешения объектов. В предлагаемой статье рассмотрен и проанализирован метод измерения угловых координат объектов, движущихся независимо друг от друга в составе группы. Предложенный метод измерения угловых координат основан на анализе статистических характеристик комплексных коэффициентов отражения группы объектов и учете погрешностей измерения их скоростей. Для повышения разрешающей способности угломера был использован инверсный синтез апертуры антенны.

Ключевые слова: береговые радиолокационные системы, угловые координаты, апертура антенны, инверсный синтез, разрешающая способность, группа объектов.

Для цитирования: Артюшенко В.М., Самаров Е.К. Определение угловых координат независимо движущихся группы объектов береговыми радиолокационными системами. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 158—165. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.016.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.016>

Determination of the angular coordinates of an independently moving group of objects by ship-based radar systems

Vladimir M. Artyushenko¹ artuschenko@mail.ru, Eugene K. Samarov² omega511@mail.ru,

¹Technological University named after A.A. Leonov (branch of MIIGAik),

²St. Petersburg State Marine Technical University

Abstract. In the practice of radio engineering measurements of coastal radar systems, the task of determining the angular coordinates of independently moving objects within the antenna's radiation pattern is of particular interest. The angular coordinates of such objects must be measured either after the objects have been resolved, i.e., the separation of signals reflected from a group of objects, or in conjunction with it. The most commonly used method is frequency resolution, which involves analyzing the spectrum of the reflected signal. However, frequency resolution may not always meet the requirements for resolving objects moving at the same radial velocity. In addition, it is desirable to use the results of the angular resolution of objects for the task of measuring angular coordinates. This article discusses and analyzes a method for measuring the angular coordinates of objects that move independently of each other as part of a group. The proposed method for measuring angular coordinates is based on analyzing the statistical characteristics of the complex reflection coefficients of a group of objects and taking into account the errors in measuring their velocities. Inverse synthesis of the antenna aperture was used to improve the angular resolution of the angle meter.

Keywords: ship-based radar systems, angular coordinates, antenna aperture, inverse synthesis, resolution capacity, and object group.

For citation: Vladimir M. Artyushenko, Eugene K. Samarov Determination of the angular coordinates of a group of independently moving objects by coastal radar systems. Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 158—165. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.016.

Введение

Особый интерес в практике радиотехнических измерений береговых радиолокационных систем вызывает задача определения угловых координат

(УК) объектов, движущихся в пределах диаграммы направленности антенны независимо друг от друга. Наиболее часто для измерения УК таких объектов применяют метод частотного разрешения, анализируя спектр отраженного сигнала [1-7]. Однако

данный метод не всегда удовлетворяет требованиям, предъявляемым к разрешению объектов, движущихся с одинаковой радиальной скоростью. Кроме того, для измерения береговыми радиолокационными системами УК желательно использовать результаты углового разрешения этих объектов.

Для улучшения углового разрешения береговыми радиолокационными системами можно применять синтез апертуры антенны [8-11], сверхразрешение [12-15], сверхразрешение совместно с синтезом апертуры антенны.

Рассмотрим и проанализируем метод измерения УК береговыми радиолокационными системами, в котором для улучшения разрешающей способности будет использован цифровой синтез апертуры антенны.

Цифровой синтез апертуры антенны

Для радиолокационных станций (РЛС) берегового базирования (малоподвижных) существует разновидность цифрового синтеза апертуры, называемого инверсным [2-5], в основе которого лежит эффект смещения доплеровской частоты отраженного сигнала за счет изменения ракурса лоцируемого объекта (наличие тангенциального перемещения или вращения объекта на интервале наблюдения).

Существует зависимость между углом наблюдения, относительным угловым положением, объекта и смещением доплеровской частоты. Она очень важна для задач углового разрешения объектов методами инверсного синтеза апертуры антенны, а ее наличие подтверждается аналитическим описанием импульсной характеристики отраженного сигнала [16-20]:

$$h(t, \beta, \varepsilon) = G(\beta, \varepsilon) \times \exp \left\{ -i2\chi \left(V_r t + \frac{a_r t^2}{2} \right) - V_{T\beta} \beta t - V_{T\varepsilon} \varepsilon t - \frac{V_{T\beta}^2 t^2}{2R_0} - \frac{V_{T\varepsilon}^2 t^2}{2R_0} \right\}, \quad (1)$$

где $G(\beta, \varepsilon)$ – учитывает уровень диаграммы направленности антенны в направлении объекта; β, ε – азимут и угол места объекта; $\chi = 2\pi/\lambda$ – волновое число; V_r, a_r – радиальная скорость и ускорение объекта; $V_{T\beta}, V_{T\varepsilon}$ – тангенциальные скорости движения объекта по азимуту и углу места; R_0 – расстояние до центра зоны обзора.

Из анализа выражения (1) следует, что если точно известны значения составляющих скорости движения локального источника вторичного излучения (ЛИВИ), то можно достаточно точно оценить его угловое положение. Эффективное значение когерентного накопления отраженного сигнала окажется в доплеровском пространственном фильтре с координатами β и ε . Ширина фильтра обратно пропорциональна интервалу синтеза.

Однако точные значения составляющих скорости движения объектов, как правило, не известны. Ошибка компенсации перемещения объекта приводит к смещению отклика по пространственным координатам, что делает невозможной оценку УК объекта по формируемому изображению (проявляется несоответствие оценки угловой координаты доплеровскому смещению частоты отраженного сигнала).

Для устранения этого несоответствия воспользуемся пространственно-временным подходом к обработке отраженного сигнала. Реализация подхода базируется на многоканальном построении РЛС. Наибольшие потенциальные возможности имеют многоканальные РЛС с фазированными антенными решетками (ФАР). Поэтому рассмотрим метод измерения УК неразрешаемых объектов, используя инверсный синтез апертуры, для РЛС с фазированными антенными решетками.

Метод измерения угловых координат неразрешаемых объектов, на основе инверсного синтеза апертуры антенны с фазированными решетками

Известно, что множество реальных малоразмерных простых объектов или отдельные центры рассеяния сложных объектов можно описать с помощью ЛИВИ, поэтому рассмотрим сначала модель сигнала, создаваемого на выходе элемента ФАР точечным объектом с известными параметрами его движения при следующих исходных предположениях.

Пусть задана плоская стабилизированная в пространстве ФАР ($M \times N$), ось которой направлена в центральную точку $O(0, y_0, 0)$ исследуемой области пространства. Угловые размеры этой области в горизонтальной ($-\theta_{\beta 0}/2 \leq \beta \leq \theta_{\beta 0}/2$) и вертикальной ($-\theta_{\varepsilon 0}/2 \leq \varepsilon \leq \theta_{\varepsilon 0}/2$) плоскостях не превышают размеров диаграммы направленности ФАР (рис. 1).

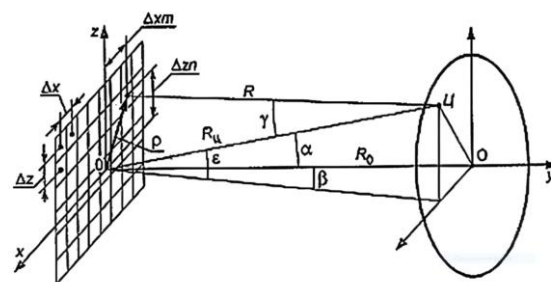


Рис. 1. Геометрия математической модели отраженного сигнала

Отраженный от точечной цели $\mathcal{L}(x_{ц}, y_{ц}, z_{ц})$ сигнал на выходе элемента ФАР с координатами $\rho_{mn} = (x_m, z_n)$ можно описать следующей формулой:

$$s_{mnц}(t) = k_{отр} G^2[\beta, \varepsilon] \times \exp \{ i\omega_0 [t - \tau_{ц}(t) - \Delta R_{mnц}(t)/c] \}, \quad (2)$$

где $k_{отр} = E_{ц} \exp \{ i(\varphi_{ц} + \varphi_0) \}$ – комплексный коэффициент отражения объекта; $\varphi_{ц}$ – его случайная фаза, φ_0 – начальная фаза; $G^2[\beta, \varepsilon]$ – диаграмма направленности элемента ФАР; $\omega_0 = 2\pi f_0$ – угловая несущая частота; $\tau_{ц}(t) = 2R_{ц}(t)/c$ – время запаздывания сигнала, отраженного от объекта, $R_{ц}$ – расстояние до цели, c – скорость света; $\Delta R_{mnц}(t) = R_{mnц}(t) - R_{ц}(t)$ – разность хода сигнала от объекта до элементов ФАР с координатами $\rho_{mn} = (x_m, z_n) = (\Delta x_m, \Delta z_n)$ и $\rho_0 = (0, 0)$.

При выполнении условия дальней зоны фронт волны, отраженной от цели и падающей на раскрыв ФАР, можно считать плоским. Тогда, учитывая, что

углы в (2) обычно не превышают единиц градусов, имеем

$$\Delta R_{mnc}(t) = x_m \beta + z_n \varepsilon. \quad (3)$$

Текущее расстояние от центра антенны до объекта можно аппроксимировать выражением вида

$$R_{nc}(t) = R(t, \beta, \varepsilon) \approx R_0 + V_r t + \frac{a_r t^2}{2} - V_{T\beta} \beta t - V_{T\varepsilon} \varepsilon t. \quad (4)$$

С учетом соотношений (3) и (4) перепишем (2), разделив на сомножители:

$$s_{mn}(t) = k_{отр} s(t, \beta, \varepsilon) S(x_m, z_n, \beta, \varepsilon), \quad (5)$$

где

$$s(t, \beta, \varepsilon) = \exp\{\omega_0 t\} \times \exp\left\{i2\chi\left(V_r t + \frac{a_r t^2}{2} + \psi_0\right)\right\} \times \exp\{-i2\chi(V_{T\beta} \beta t + V_{T\varepsilon} \varepsilon t)\}, \quad (6)$$

– временная составляющая, описывающая закон изменения фазы отраженного сигнала на интервале наблюдения;

$$S(x_m, z_n, \beta, \varepsilon) = G^2[\beta, \varepsilon] \exp\{-i\chi(x_m \beta + z_n \varepsilon)\}, \quad (7)$$

– пространственный фазовый множитель.

Первая экспонента в (6), зависящая от ω_0 , компенсируется в фазовом детекторе. Начальную фазу $\psi_0 = 2\chi R_0$ во второй экспоненте отнесем к комплексному коэффициенту отражения $k_{отр}$. Тогда временной сомножитель примет вид сигнала с линейной частотной модуляцией

$$S(t, \beta, \varepsilon) = \exp\left\{i2\chi\left(V_r t + \frac{a_r t^2}{2}\right)\right\} \times \exp\{-i2\chi(V_{T\beta} \beta t + V_{T\varepsilon} \varepsilon t)\} \quad (8)$$

Первая экспонента описывает изменение доплеровской частоты сигнала от центра картинной плоскости, а вторая – приращение частоты, вызванное смещением ЛИВИ на углы β и ε . Выражение (8) связывает доплеровскую частоту отраженного сигнала и угловые координаты ЛИВИ с известными параметрами движения.

Ширина диаграммы направленности элемента решетки по азимуту и углу места в M и N раз больше угловых размеров анализируемой области пространства, поэтому модуляцией сигнал диаграммы направленности элемента ФАР можно пренебречь, приняв $G^2[\beta, \varepsilon] \equiv 1$.

Тогда выражение (7) примет вид

$$S(x_m, z_n, \beta, \varepsilon) = \exp\{-i\chi(x_m \beta + z_n \varepsilon)\}, \quad (9)$$

Полученная математическая модель (6) описывает сигнал, отраженный от ЛИВИ, на интервале наблюдения с известными параметрами движения. Однако на практике эти параметры априори не известны, поэтому модель требует уточнения и обобщения на случай их ошибочного измерения.

В РЛС измеряется среднее значение радиальной скорости группы объектов, однако радиальная скорость каждого ЛИВИ может отличаться от этого значения в пределах среднеквадратического отклонения измерителя. Появляется ошибка прогнозирования поведения отраженного сигнала на интервале наблюдения, что вызывает погрешность измерения угловых координат ЛИВИ. Кроме того, тангенциальная скорость движения ЛИВИ вообще не измеряется, что также негативно влияет на точность измерения УК.

При уточнении математической модели учтем несколько упрощающих ограничений, которые не влияют на ее качество:

1. Вследствие малого времени наблюдения линейные и угловые перемещения ЛИВИ считаются незначительными, не изменяющими направление прихода волны на апертуру ФАР.

2. Наблюдаемый сигнал не выходит за пределы строка дальности под действием разности измеренной и истинной скорости отдельного ЛИВИ.

3. На интервале наблюдения ЛИВИ перемещается не более чем на половину элемента углового разрешения, что позволяет пренебречь квадратичными членами в импульсной характеристике (1).

С учетом введенных ограничений уточнение математической модели касается только выражения (8). В его второй экспоненте присутствуют две априори неизвестные тангенциальные скорости – по азимуту и углу места, что крайне неудобно. Поскольку задача измерения УК планируется возложить на пространственный множитель, то имеет смысл $V_{T\beta}$ и $V_{T\varepsilon}$ заменить одной тангенциальной скоростью:

$$V_T = \sqrt{V_{T\beta}^2 + V_{T\varepsilon}^2},$$

а углы β и ε – одним углом α ($\cos \alpha = \cos \beta \cos \varepsilon$) (см. рис. 1).

Тогда выражение (8) с учетом ошибки прогнозирования радиальной скорости можно переписать в виде

$$S(t, \alpha) = \exp\left\{i2\chi\left(V_r t + \frac{a_r t^2}{2}\right)\right\} \times \exp\{-i2\chi(V_T \alpha t)\} \exp\{i2\chi(\Delta V_r t)\},$$

где ΔV_r – разность между радиальной скоростью ЛИВИ и измеренным значением для группы объектов.

Для движения группы объектов с постоянной радиальной скоростью

$$S(t, \alpha, V_r, \Delta V_r) = \exp\{i2\chi(V_r t)\} \times \exp\{-i2\chi(V_T \alpha t)\} \exp\{i2\chi(\Delta V_r t)\}, \quad (10)$$

В (10) априори известной считается только первая экспонента, остальные неизвестны.

Отраженный от точечной цели сигнал принимается независимо во всех каналах ФАР и его удобно представить в виде матрицы $M \times N$:

$$S_l(t) = \|S_{mn}(t)\| = k_{отр,l} \|h_{mn}(t)\| = k_{отр,l} \mathbf{h}(t), \quad (11)$$

где $h_{mn}(t) = S(x_m, z_n, \beta, \varepsilon) S(t, \alpha, V_r, \Delta V_r)$ – сигнал от одноточечной цели с единичной амплитудой, имеющей смысл импульсной характеристики.

В связи с тем, что группа объектов описывается набором ЛИВИ, отраженный от нее сигнал составляет суперпозицию сигналов, попавших от L отражателей в диаграмму направленности ФАР:

$$S(t) = \sum_{l=-L/2}^{L/2} k_{отр,l} \mathbf{h}(t)$$

или в векторно-матричной форме

$$S(t) = \mathbf{H}(t) \mathbf{E},$$

где $\mathbf{H}(t)$ – вектор-столбец размерности $l \times L$ с элементами $h_l(t)$, представляющими собой матрицы $M \times N$.

Выражение (12) с составляющими (9) – (11) является математической моделью сигнала, отраженного от группы объектов, на выходе ФАР.

Статистические характеристики функции комплексных коэффициентов отражения группы объектов в картинной плоскости

Рассмотрим статистические характеристики функции комплексных коэффициентов отражения группы объектов в картинной плоскости. Ввиду того, что положение объектов априори неизвестно, приходится рассматривать отражательные свойства всей картинной плоскости как однородного объекта с адекватными свойствами его элементов.

Разобьем картинную плоскость на элементарные площадки

$$\Delta S = \Delta \beta R_0 \times \Delta \varepsilon R_0 = \Delta x \times \Delta z,$$

у которых центры рассеяния совпадают с геометрическими $A_l(x_l, R_0, z_l)$ (рис. 2).

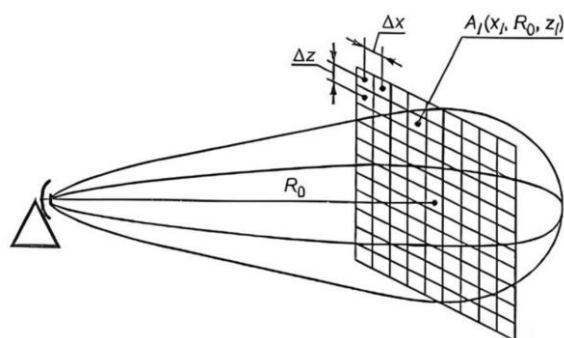


Рис. 2. Геометрия картинной плоскости

Если заранее не известно количество ЛИВИ, накрываемых элементарной площадкой, то ее приходится рассматривать как сосредоточенный объект, содержащий множество расположенных случайным образом рассеивающих элементов.

Заметим, что комплексный коэффициент отражения $k_{отр,l}$ (см. выражение (2)) имеет амплитудный и фазовый множители.

В теории радиолокации известно, что если сосредоточенный объект рассматривается как множество расположенных случайным образом рассеивающих элементов, то амплитуда комплексного коэффициента распределена по обобщенному закону Релея, а фаза – по равномерному. Тогда сам комплексный коэффициент отражения распределен по нормальному закону с плотностью вероятности вида

$$W(k_{отр,l}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{k_{отр}}}} \exp \left\{ -\frac{|k_{отр,l} - m_{k_{отр}}|^2}{2D_{k_{отр}}} \right\}, \quad (13)$$

где $m_{k_{отр}}$ – математическое ожидание; $D_{k_{отр}}$ – дисперсия.

Если ЛИВИ, накрываемые площадкой, имеют приблизительно одинаковую мощность рассеяния, то амплитуда комплексного коэффициента рассеяния площадки распределена по закону Релея, а $m_{k_{отр}} = 0$. Если же один из элементов обладает большей интенсивностью, чем остальные (отражение с доминирующей блестящей точкой), то амплитуда распределена по закону Райса, а $m_{k_{отр}} \neq 0$. Коэффициенты отражения соседних элементов принимаются независимыми.

Выяснив отражательные свойства картинной плоскости, перейдем к анализу импульсной характеристики (см. выражение (12)).

Анализ импульсной характеристики

В соответствии с (5) матрицу импульсной характеристики h можно разложить на временную h_b и пространственную h_n составляющие

$$h(t, \beta, \varepsilon, V_T, \Delta V_r) = h_b(t, V_T, \Delta V_r) h_n(\beta, \varepsilon),$$

где $h_b(t, V_T, \Delta V_r) = S(t, V_T, \Delta V_r)$ – скалярная функция; $h_n(\beta, \varepsilon) = \|S(x_m, \beta, z_n, \varepsilon)\|$ – матрица $M \times N$ элементов.

Особое внимание при анализе импульсной характеристики следует обратить на априори неизвестные параметры V_T и ΔV_r . Знание их законов распределения играет существенную роль при синтезе измерителя.

Примем, что тангенциальные скорости ЛИВИ имеют равномерное распределение, а разности радиальных скоростей ЛТВИ и измеренной в РЛС для группы – нормальное с нулевым математическим ожиданием:

$$W(\Delta V_{r,l}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_V}} \exp \left\{ -\frac{|\Delta V_{r,l}|^2}{2D_V} \right\}, \quad (14)$$

где D_V – дисперсия измерителя радиальной скорости.

Кроме того, отраженный сигнал наблюдается на фоне шумов, неизменно присутствующих в радиотехнических измерениях и вызванных фоновым электромагнитным излучением окружающей среды, внутренними шумами радиоэлектронной аппаратуры и другими явлениями. Наиболее часто эти шумы учитываются в модели наблюдаемого сигнала с помощью белого шума Гаусса. В нашем случае также можно согласиться с этой моделью, поскольку внутри сравнительно небольшого телесного угла, в котором ведется прием, рассматриваемые помехи имеют примерно постоянную угловую плотность мощности. В случае, если реальные шумы не удовлетворяют модели белого шума, то принимают меры к их отбеливанию, что несущественно меняет математическую модель наблюдаемого сигнала.

Таким образом, окончательная модель наблюдаемого сигнала (уравнение наблюдения) примет вид

$$U(t) = H(t, V_T, V_r)E + N(t), \quad (15)$$

где V_T – вектор тангенциальных скоростей; V_r – вектор разностей радиальных скоростей ЛИВИ; $N(t)$ – вектор независимых комплексных гауссовых шумов с одинаковой спектральной плотностью N_0 .

Полезный сигнал

$$S(t) = H(t, V_T, V_r)E,$$

представляет собой квазислучайный процесс – детерминированную функцию времени со случайными параметрами $k_{отр}$, V_T , V_r , часть из которых (V_T , V_r) входит в сигнал нелинейно. Все компоненты векторных параметров сигнала являются независимыми случайными величинами. Компоненты векторов E , V_r распределены по нормальному закону, а вектора V_T – по равномерному.

Таким образом, получено полное математическое описание всех функциональных связей и статистических характеристик для модели пространственно-временного сигнала (15).

Рассмотрим и проанализируем задачу разрешения и оценки УК объектов, составляющих группу, и ее решение с помощью известных методов статистической обработки сигналов.

Задача разрешения и оценки УК объектов, составляющих группу

Заметим, что наиболее полно статистическая задача решена тогда, когда найдена функция апостериорной плотности вероятности оцениваемых параметров (V_r) [21]. На конечном интервале наблюдения $-T/2 \leq t \leq T/2$ в общем виде ее можно записать так:

$$W(V_r|U(t)) = \gamma_1 W_a(V_r) F(U(t)|V_r),$$

где $W_a(V_r)$ – априорная плотность вероятности вектора V_r ; $U(t)$ – реализация отраженного сигнала на интервале $-T/2 \leq t \leq T/2$; γ_1 – нормирующий множитель; $F(U(t)|V_r)$ – функционал правдоподобия.

Кроме вектора V_r в наблюдаемом сигнале присутствуют дополнительные, сопутствующие, неизвестные параметры E и V_{Ti} , мешающие точному оцениванию. Устранить их из функционала правдоподобия можно методом усреднения

$$F(U(t)|V_r) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_a(E) \times \\ \times W_a(V_{Ti}) F(U(t)|V_r, E, V_{Ti}) dE dV_{Ti} \quad (16)$$

Аналитическое усреднение эффективно при достаточно простых законах априорного распределения, поскольку оно является сложной аналитической задачей. Примем его для вектора тангенциальных скоростей, имеющих условно равномерное распределение. Для снижения вычислительных затрат сведем задачу усреднения по непрерывному параметру к аналогичной – по дискретному. Тогда вместо (16) имеем

$$F(U(t)|V_r) = \\ = \sum_{i=1}^K \rho_i \int_{-\infty}^{\infty} W_a(E) F(U(t)|V_r, E, V_{Ti}) dE. \quad (17)$$

Функционал правдоподобия (17) вычисляется в многоканальном устройстве, в каждом канале которого находятся его частные значения при фиксированной тангенциальной скорости:

$$F(U(t)|V_r, V_{Ti}) = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} W_a(E) F(U(t)|V_r, E, V_{Ti}) dE,$$

а затем частные функционалы суммируются с равными весами ρ_i .

Сопутствующие параметры E включим в число оцениваемых, что приведет к расширению вектора оцениваемых параметров:

$$\Lambda = \|V_r, E\|^T.$$

Входящие в новый вектор параметры обладают нормальным распределением, поэтому он будет иметь такое же распределение. Для нового вектора параметров апостериорная плотность имеет вид

$$W(\Lambda|U(t)) = \gamma_1 W_a(\Lambda) F(U(t)|\Lambda), \quad (18)$$

где для независимых векторов

$$W_a(\Lambda) = W_a(V_r) W_a(E); \quad (19)$$

$$F(U(t)|\Lambda) = \gamma_N \sum_{i=1}^K \rho_i \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \int_{-T/2}^{T/2} [U(t) - S(t, \Lambda)]^* [U(t) - S(t, \Lambda)] dt \right\}$$

Найдем оптимальную оценку вектора $\hat{\Lambda}$ по критерию максимума апостериорной вероятности (МAB)

$$W(\Lambda|U(t)) = \max_{\hat{\Lambda}_{\text{MAB}}}$$

которая уравнение вида

$$\frac{\partial}{\partial \Lambda} \ln \{W(\Lambda|U(t))\} = 0 \quad (20)$$

превращает в тождество.

Что касается выполнения критерия МAB применительно к дискретной оценке V_r , то оно сводится к нахождению i -го канала с максимальным значением апостериорной плотности вероятности

при фиксированной тангенциальной скорости. Поскольку структура каждого из каналов будет одинакова, то дальнейший синтез измерителя можно ограничить синтезом структуры одного канала.

Располагая априорными сведениями о статистическом распределении оцениваемого вектора параметров (Λ) , а также доступными реализациями случайного процесса $U(t)$ и его математической моделью (15), сформируем оптимальную по критерию МAB апостериорную оценку $(\hat{\Lambda})$ на интервале наблюдения T при фиксированной тангенциальной скорости ЛИВИ.

Априорная плотность вероятности с учетом выражений (13), (14) и (19) имеет вид

$$W_a(\Lambda) = W_a(V_r) W_a(E) = \\ = \left(\frac{1}{(2\pi)^2 D_{k_{отп}} D_V} \right)^{L/2} \exp \left\{ -\frac{E^* E}{2 D_{k_{отп}}} - \frac{V_r^* V_r}{2 D_V} \right\}. \quad (21)$$

Функционал правдоподобия $F(U(t)|\Lambda)$ можно переписать так:

$$F(U(t)|V_r, E) = k_N \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \int_{-T/2}^{T/2} [U(t) \cdot U(t)] dt + \right. \\ \left. + 2 \operatorname{Re} E^* C(V_r) - E^* G_{\text{ц}}(V_r) E \right\}, \quad (22)$$

где

$$G_{\text{ц}}(V_r) = \|g_{\text{ц}lk}(\Delta V_{rl})\| = \frac{1}{N_0} \int_{-T/2}^T H^*(t, V_r) U(t) dt$$

– взаимная корреляционная матрица $L \times L$ сигналов, отраженных от всех ЛИВИ;

$$C(V_r) = \|c_l(\Delta V_{rl})\| = \frac{1}{N_0} \int_{-T/2}^T H^*(t, V_r) U(t) dt$$

– вектор $L \times 1$ сигналов на выходе коррелятора или согласованного фильтра.

Для апостериорной плотности вероятностей (18) с учетом выражений (21) и (22) уравнение (20) может быть представлено в виде системы матричных уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{N_0}{2 D_{k_{отп}}} I + G_{\text{ц}}(\hat{V}_r) \right] \hat{E} - C(\hat{V}_r) = 0; \\ & \left[\frac{\partial}{\partial V_r^T} \left[\hat{E}^* \left[\frac{N_0}{2 D_{k_{отп}}} I + G_{\text{ц}}(\hat{V}_r) \right] \hat{E} - 2 \operatorname{Re} \hat{E} C(\hat{V}_r) \right] + \frac{N_0}{2 D_V} \hat{V}_r \right] = 0, \end{aligned} \right. \quad (23)$$

решением которой являются искомые оценки $\hat{E} = \hat{E}_{\text{MAB}}$ и $\hat{V}_r = \hat{V}_{r\text{MAB}}$.

Найденный по выражению (23) вектор оценок $\hat{E}$ представляет собой комплексное радиолокационное изображение картинной плоскости с истинными угловыми положениями отметок ЛТВИ, а $\hat{V}_r$ характеризует распределение радиальных скоростей ЛИВИ, то есть является скоростным портретом картинной плоскости.

Разрешив первое матричное уравнение относительно неизвестного вектора $\hat{E}$ и подставив полученное выражение во второе, получим

$$\left\{ \begin{aligned} & \hat{E} = \left[\frac{N_0}{2 D_{k_{отп}}} I + G_{\text{ц}}(\hat{V}_r) \right]^{-1} C(\hat{V}_r); \\ & \left[\frac{\partial}{\partial V_r^T} \left[C^*(\hat{V}) \left[\frac{N_0}{2 D_{k_{отп}}} I + G_{\text{ц}}(\hat{V}_r) \right]^{-1} C(\hat{V}) \right] - \frac{N_0}{D_V} \hat{V}_r \right] = 0. \end{aligned} \right. \quad (24)$$

Заметим, что обратная матрица $G_{\text{ц}}^{-1}(\hat{V}_r)$ может быть плохо обусловлена, то есть иметь малый детерминант. В этом случае вычислить ее помогают методы решения некорректных задач, в частности, это могут быть методы регуляризации Тихонова [22].

Систему нелинейных уравнений (24) можно решить после того, как в явном виде будут записаны

достаточно громоздкие формулы для компонент вектора производных

$$F(\hat{V}_r) = \frac{\partial}{\partial V_r^T} \left[\mathbf{C}^*(\hat{V}_r) \left[\frac{N_0}{2D_{\text{конт}}} \mathbf{I} + \mathbf{G}_c(\hat{V}_r) \right]^{-1} \mathbf{C}(\hat{V}_r) \right]$$

любым известным методом решения системы нелинейных алгебраических уравнений. Однако такие вычисления весьма трудоемки и не реализуемы в радиотехнических измерителях.

Введем некоторые ограничения, в рамках которых метод дает более простые решения. Допустим, что соблюдаются следующие условия:

1) размеры элементарного участка картинной плоскости $(\Delta_\alpha, \Delta_\beta, \Delta_\varepsilon)$ равны разрешающим способностям $(\rho_\alpha, \rho_\beta, \rho_\varepsilon)$;

2) непрерывные координаты α_l, β_l и ε_l можно заменить дискретными эквивалентами: $\alpha_l = \Delta_\alpha l, \beta_l = \Delta_\beta l_\beta$ и $\varepsilon_l = \Delta_\varepsilon l_\varepsilon$, где $l, l_\beta, l_\varepsilon$ связаны соотношением $\cos(\Delta_\alpha l) = \cos(\Delta_\beta l_\beta) \cos(\Delta_\varepsilon l_\varepsilon)$;

3) из-за неточного описания параметров отметка ЛИВИ смещается на углы, кратные элементам разрешения, то есть кажущиеся угловое положение ЛИВИ имеет координаты: $\beta_k = \Delta_\beta (l_\beta + i_\beta)$, $\varepsilon_k = \Delta_\varepsilon (l_\varepsilon + i_\varepsilon)$, где $i_\beta = \Delta V_r / (\Delta_\beta V_{T\beta})$ и $i_\varepsilon = \Delta V_r / (\Delta_\varepsilon V_{T\varepsilon})$ – число элементов разрешения, на которые сместилась отметка ЛИВИ;

4) отношение сигнал/шум (ОСШ) на входе устройства обработки имеет малую величину.

В теории оптимальной фильтрации и оценивания доказано, что с уменьшением ОСШ во входной реализации, с точки зрения качества оценивания, оптимальный фильтр может быть заменен согласованным. Для него обратные корреляционные матрицы в (24) становятся диагональными, что позволяет записать достаточно простое уравнение оценки ΔV_r :

$$z(\Delta \hat{V}_r) = \text{Re} \left[c^*(\Delta \hat{V}_r) \frac{\partial}{\partial \Delta \hat{V}_r} c(\Delta \hat{V}_r) \right] = 0.$$

Составляющие этого выражения с учетом введенных ограничений можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} c(\Delta \hat{V}_r) &= \int_{-T/2}^{T/2} \exp\{i2\chi(V_r t)\} \exp\{-i2\chi(V_r \Delta_\alpha k t)\} \times \\ &\times \sum_{n=-N/2}^{N/2} \sum_{m=-M/2}^{M/2} U_{mn}(t) \times \\ &\times \exp\{i\chi(x_m \Delta_\beta (k_\beta - i_\beta) + z_n \Delta_\varepsilon (k_\varepsilon - i_\varepsilon))\} dt; \quad (25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \Delta \hat{V}_r} c(\Delta \hat{V}_r) &= \frac{\Delta_\beta}{\Delta V_\beta} \frac{\Delta_\varepsilon}{\Delta V_\varepsilon} \int_{-T/2}^{T/2} \exp\{i2\chi(V_r t)\} \exp\{-i2\chi(V_r \Delta_\alpha k t)\} \times \\ &\times \sum_{n=-N/2}^{N/2} \sum_{m=-M/2}^{M/2} U_{mn}(t) i\chi x_m i\chi z_n \times \\ &\times \exp\{i\chi(x_m \Delta_\beta (k_\beta - i_\beta) + z_n \Delta_\varepsilon (k_\varepsilon - i_\varepsilon))\} dt. \quad (26) \end{aligned}$$

Если не обращать внимание на несущественные коэффициенты $\Delta_\beta / \Delta V_\beta$ и $\Delta_\varepsilon / \Delta V_\varepsilon$, то видно, что выражения (25) и (26) отличаются множителями, описывающими пространственную обработку сигналов, то есть диаграмму направленности антенны соответствующей формы. В (25) диаграмма направленности имеет равномерное амплитудно-фазовое распределение, а в (26) – линейно нарастающее, о чем свидетельствуют сомножители $i\chi x_m i2\chi x_m$ и $i\chi z_n i2\chi z_n$. Выражаясь языком моноимпульсной радиолокации [23], пространственный сомножитель в (25) описывает суммарную диаграмму направленности, а в (26) –

разностную в двух плоскостях: азимутальной и угломестной.

В структуре алгоритма измерения УК (рис. 3) можно выделить два независимых канала (суммарный и разностный), построенные на базе пространственно-временных корреляторов (ПВК).

Алгоритм измерения угловых координат ЛИВИ в картинной плоскости работает следующим образом:

1) для разных тангенциальных скоростей (V_r) , а также величин Δ_β и Δ_ε k -го доплеровского фильтра $(\Delta_\alpha k)$ вычисляются k_β, k_ε и находится значение $z(\Delta \hat{V}_r)$. Если модуль $z(\Delta \hat{V}_r)$ не превышает порогового значения, то $\Delta \hat{V}_r$ считается равной нулю, а отметка ЛИВИ – несмещенной при условии, что сигнал $(|c(\Delta \hat{V}_r)|)$ в суммарном ПВК превысил порог обнаружения;

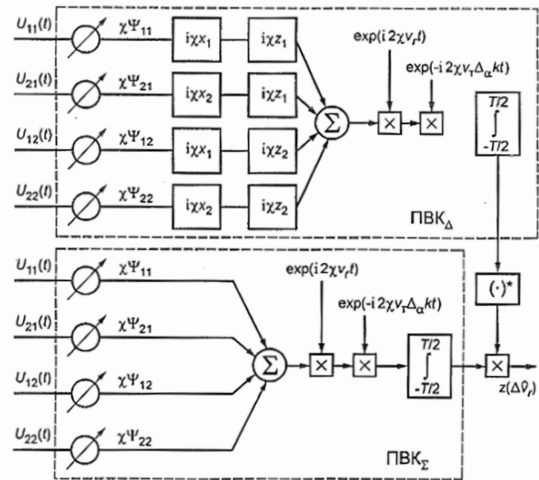


Рис. 3. Структурная схема алгоритма пространственно-временной согласованной обработки:

$$\Psi_{mn} = x_m \Delta_\beta (k_\beta - i_\beta) + z_m \Delta_\varepsilon (k_\varepsilon - i_\varepsilon)$$

2) если значение $z(\Delta \hat{V}_r)$ вышло за границы «нулевого» диапазона, то последовательно изменяя $i_\beta, i_\varepsilon = \pm 1, \pm 2, \dots$ и сравнивая каждый раз $z(\Delta \hat{V}_r)$ с порогом, находим i_β и i_ε , при которых выполняется первый пункт. Эти значения характеризуют смещение отметки ЛИВИ в картинной плоскости, тогда номер дискреты истинного углового положения $l_\beta = k_\beta - i_\beta; l_\varepsilon = k_\varepsilon - i_\varepsilon$. Если интересует точное значение радиальной скорости ЛИВИ, то его можно найти по формуле

$$\Delta V_r = \Delta_\alpha i V_r,$$

где $\Delta_\alpha i = \arccos[\cos(\Delta_\beta i_\beta) \cos(\Delta_\varepsilon i_\varepsilon)]$.

Проверка разработанного алгоритма измерения УК выполнялась на полунатурном макете, имитирующем отражение от одноточечного объекта. Результаты эксперимента доказали работоспособность как алгоритма, так и метода в целом.

Заключение

Хотя структура алгоритма точной оценки углового положения ЛИВИ подобна структуре обобщенного фазового дискриминатора первого рода для

сигналов со случайными амплитудой и фазой [1], принципы функционирования их различаются. Это связано с тем, что нетрадиционно решена задача оценки радиальной скорости. Оценка скорости находится не по доплеровскому смещению частоты, а по угловому смещению отметки ЛИВИ в картинной плоскости.

Рассмотренный и проанализированный алгоритм имеет двойное назначение: во-первых, он восстанавливает истинные угловые координаты ЛИВИ, тем самым разрешая проблему

несоответствия доплеровской частоты угловой координате; во-вторых, - формирует скоростной портрет картинной плоскости, что несет дополнительную информацию о наблюдаемой группе объектов.

Рассмотренный алгоритм можно реализовать в программном обеспечении вычислительной системы РЛС на базе известных методов построения изображений [24]: прямой свертки, быстрой свертки и гармонического анализа.

Литература

1. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
2. Справочник по гидроакустике / Евтютов А.П., Колесников А.Е., Ляликов А.П. и др. Л.: Судостроение, 1982. 344 с.
3. Голубков А.Г. Специализированные гидроакустические системы. Л.: Судостроение, 1987. 136 с.
4. Яковлев А.Н., Коблов Г.П. Гидролокаторы ближнего действия. Л.: Судостроение, 1983. 200 с.
5. Бакут Л.А., Жулина Ю.В., Иванчук Н.А. Обнаружение движущихся объектов / Под ред. П.А. Бакута. М.: Сов. радио, 1980. 288 с.
6. Теоретические основы радиолокации / А.А. Коростелев, Н.Ф. Ключев, Ю.А. Мельник и др.; Под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Сов. радио, 1978. 608 с.
7. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации. М.: Радио и связь. 1983. 536 с.
8. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
9. Теоретические основы радиолокации / Я.Д. Ширман, В.Н. Голиков, И. Н. Бусыгин и др.; Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Сов. радио, 1970. 560 с.
10. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1992. 304 с.
11. Справочник по радиолокации: В 4-х т.; Пер. с англ. / Под ред. К.Н. Трофимова. – М.: Сов. радио, 1976. Т.1. 456 С.
12. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Сов. радио, 1981. 416 с.
13. Ширман Я.Д. Метод разрешения групповых сосредоточенных целей // Вест. МГТУ. Сер. Приборостроение. – 2000. №4. С. 41-52.
14. Проблемы радиолокации протяженных объектов. Свердловск.: Изд-во УПИ им. С.М. Кирова, 1983. 160 с.
15. Фельдман Ю.И., Мандуровский И.А. Теория флуктуаций локационных сигналов, отраженных распределенными целями / Под ред. Ю.И. Фельдмана. М.: Радио и связь, 1983. 160 с.
16. Цифровая обработка сигналов в РСА / Под ред. Е.Ф. Толстова. – Смоленск: Изд-во ВА ВПВО, 2005. – 232 с.
17. Слока В.К. Вопросы обработки радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио, 1970. 256 с.
18. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. Пер. с нгл. / Под ред. В.С. Кельзона. М.: Сов. радио, 1971. 568 с.
19. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Сов. радио, 1981. 416 с.
20. Свистов В.М. Радиолокационные сигналы и их обработка. М.: Сов. радио, 1977. 488 с.
21. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. – М.: Радио и связь, 1991. – 608 с.
22. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некоторых задач. – М.: Наука, 1979. – 284 с.
23. Леонов А.И., Фомичев К.И. Моноимпульсная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1984. – 392 с.
24. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Под ред. В. Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.

References

1. Shirman Ya.D., Manzhos V.N. Theory and Technique of Processing Radar Information Against the Background of Interference. – M.: Radio and Communication, 1981. – 416 p.
2. Handbook on Hydroacoustics / Evtyutov A.P., Kolesnikov A.E., Lyalikov A.P., et al. L.: Shipbuilding, 1982. 344 p.
3. Golubkov A.G. Specialized hydroacoustic systems. L.: Sudostroenie, 1987. 136 p.
4. Yakovlev A.N., Koblov G.P. Near-range sonars. L.: Sudostroenie, 1983. 200 p.
5. Bakut L.A., Zhulina Yu.V., Ivanchuk N.A. Detection of moving objects / Ed. P.A. Bakut. M.: Sov. radio, 1980. 288 p.
6. Theoretical Foundations of Radar / A.A. Korostelev, N.F. Klyuev, Yu.A. Melnik, etc.; Ed. V.E. Dulevich. – M.: Sov. radio, 1978. 608 p.
7. Finkelstein M.I. Fundamentals of radar. M.: Radio and communication. 1983. 536 p.
8. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. Radio vision. Radar systems of remote sensing of the Earth / Under the editorship of G.S. Kondratenkov. – M.: Radiotekhnika, 2005. – 368 p.

9. Theoretical Foundations of Radar / Ya.D. Shirma, V.N. Golikov, I.N. Busygin, etc.; Ed. Ya.D. Shirmana. M.: Sov. radio, 1970. 560 p.
10. Sosulin Yu.G. Theoretical Foundations of Radar and Radio Navigation: Textbook for Universities. – M.: Radio and Communication, 1992. 304 p.
11. Handbook on Radar: In 4 volumes; Translated from English / Edited by K.N. Trofimov. – Moscow: Sov. Radio, 1976. Vol. 1. 456 p.
12. Shirman Ya.D., Manzhos V.N. Theory and Technique of Processing Radar Information Against the Background of Interference. – Moscow: Sov. Radio, 1981. 416 p.
13. Shirman Ya.D. The method of resolution of group concentrated targets // Vest. MGTU. Ser. Instrument engineering. – 2000. No. 4. Pp. 41-52.
14. Problems of radar of extended objects. Sverdlovsk.: Publishing house of UPI of S.M. Kirov, 1983. 160 p.
15. Feldman Yu.I., Mandurovsky I.A. Theory of Fluctuations of Localization Signals Reflected by Distributed Targets / Ed. Yu.I. Feldman. M.: Radio and Communication, 1983. 160 p.
16. Digital Signal Processing in RSA / Ed. E.F. Tolstov. – Smolensk: Publishing House of the Military Academy of Air Defense, 2005. – 232 p.
17. Sloka V.K. Issues of processing radar signals. M.: Sov. radio, 1970. 256 p.
18. Cook Ch., Bernfeld M. Radar signals. Per. from English / Ed. by V.S. Kelzon. M.: Sov. radio, 1971. 568 p.
19. Shirman Ya.D., Manzhos V.N. Theory and Technique of Processing Radar Information Against the Background of Interference. – M.: Sov. radio, 1981. 416 p.
20. Svistov V.M. Radar Signals and Their Processing. M.: Sov. radio, 1977. 488 p.
21. Tikhonov V.I., Kharisov V.N. Statistical Analysis and Synthesis of Radio Engineering Devices and Systems. – Moscow: Radio and Communications, 1991. – 608 p.
22. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. Methods for Solving Certain Problems. – Moscow: Nauka, 1979. – 284 p.
23. Leonov A.I., Fomichev K.I. Monopulse Radar. – Moscow: Radio and Communications,
24. Radar stations with digital synthesis of the antenna aperture / Edited by V. T. Goryainov. – Moscow: Radio and Communications, 1988. – 304 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

Артюшенко Владимир Михайлович, доктор технических наук, заведующий кафедрой информационных технологий и управляющих систем Технологического университета им. А.А. Леонова, 141074, Московская область, ул. Гагарина, д. 42, e-mail: artuschenko@mail.ru

Vladimir M. Artyushenko, Dr. Sci (Eng), Head of the Department of Information Technologies and Control Systems, Technological University named after A.A. Leonov, 141074, Moscow Region, Korolev, Gagarin st. 42, e-mail: artuschenko@mail.ru

Самаров Евгений Кимович, доктор технических наук, декан факультета естественных наук Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: omega511@mail.ru

Eugene K. Samarov, Dr. Sci (Eng), Dean of the Faculty of Natural Sciences, St. Petersburg State Maritime Technical University, 190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya st., 3, e-mail: omega511@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 07.06.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.09.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 05.01.2026

Научная статья

УДК 535.372:004.891.3

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.017>

Адаптация инструментов искусственного интеллекта в программные оболочки морской робототехники в задачах обеспечения экологической безопасности морских акваторий при разливах нефтепродуктов

Прощенко Д.Ю.¹ dima.prsk@mail.ru, Коровецкий Д.А.¹ 318704@mail.ru,Чехленок А.А.¹ alexeyche88@gmail.com, Бобылев Д.С.¹ d.bobylev@mail.ru, Букин О.А.¹ o_bukin@mail.ru¹Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

Аннотация. Задачи, которые должны выполнять беспилотные воздушные суда (БВС) в морских приложениях, становятся всё более комплексными и требуют исполнения сразу нескольких функционалов. Для успешного выполнения миссий БВС в этих приложениях требуется решение сразу нескольких задач, которые осуществляют навигацию всей системы и отдельно каждого её агента, взаимодействие между агентами системы и выполнение непосредственно той миссии, которая поставлена перед мультиагентной системой. Для решения задач, входящих в каждый функционал, разрабатываются новые и адаптируются уже имеющиеся инструменты искусственного интеллекта. Однако, комплексность всей миссии требует, как правило, разработки инструментов ИИ, которые обеспечивают: взаимодействие всех функций, принятие решений на основе анализа результатов работы каждого из них, постоянной корректировки процесса исполнения заданий с учётом условий окружающей среды. В данной работе приведены результаты разработки узкоспециализированных инструментов ИИ, необходимых для выполнения функциональных возможностей миссии обеспечения экологической безопасности морских акваторий при разливах нефтепродуктов. Описаны результаты адаптации специализированных нейронных сетей и методов глубокого обучения для исполнения миссии обеспечения экологической безопасности: мониторинга морской поверхности и ликвидации плёнок нефтепродуктов методом распыления диспергентов с БВС. Приведены результаты тестирования разработанных инструментов ИИ (первичной и вторичной сегментации плёнок нефтепродуктов на морской поверхности, распознавания сортов нефтепродуктов в разливах) на реальных разливах нефтепродуктов, которые регистрировались на акватории Амурского залива в период с 2019 по 2024 г. г. Обсуждаются основные требования к инструментам ИИ, которые должны обеспечить взаимодействие функционалов и комплексность исполнения всей миссии мультиагентной системы. Эти инструменты обеспечивают более высокий уровень ИИ и приближаются к области разработок инструментов сильного ИИ.

Ключевые слова: мультиагентная система БВС, инструменты искусственного интеллекта, сегментация, нейронные сети, глубокое обучение, мониторинг разливов нефтепродуктов, ликвидация плёнок нефтепродуктов.

Финансирование: Работа поддержана в рамках проекта государственного задания Федерального Агентства Морского и Речного Транспорта № 110-00022-21-00

Для цитирования: Прощенко Д.Ю., Коровецкий Д.А., Чехленок А.А., Бобылев Д.С., Букин О.А. Адаптация инструментов искусственного интеллекта в программные оболочки морской робототехники в задачах обеспечения экологической безопасности морских акваторий при разливах нефтепродуктов. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 166—176. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.017.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.017>

Adaptation of artificial intelligence tools into framework of marine robotics in the tasks of ensuring environmental safety of marine waters during oil spills

Dmitriy Yu. Proshenko¹ dima.prsk@mail.ru, Denis A. Korovetsky¹ 318704@mail.ru,Alexey A. Chekhlenok¹ alexeyche88@gmail.com, Dmitriy S. Bobylev¹ d.bobylev@mail.ru,Oleg A. Bukin¹ o_bukin@mail.ru¹Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Russia, 690059 Vladivostok, Verkhneportovaya str., 50a; tel. (423)241-49-68

Abstract. The tasks that UAVs must perform in marine applications are becoming increasingly complex and require the execution of several functionalities at once. To successfully complete UAV missions in these applications, it is necessary to execute functionalities that perform navigation of the entire system and each of its agents separately, interaction between system agents and the execution of tasks assigned to the multi-agent system. To solve the problems included in each functionality, new artificial intelligence tools are developed and existing ones are adapted. However, the complexity of the entire mission requires, as a rule, the development of AI tools: which ensure the interaction of all functionalities, decision-making based on the analysis of the results of each of them, and constant adjustment of the process of executing functionalities taking into account environmental conditions. This paper presents the results of the development of specialized AI tools necessary for the mission of ensuring the environmental safety of marine waters during oil spills. The article describes the results of the development and adaptation of specialized neural networks and deep learning methods for the implementation of the main functionalities of this mission: the

functionality of monitoring the sea surface and the functionality of eliminating oil slicks by spraying dispersants from BBCs. The results of testing the developed AI tools on real oil spills that were recorded in the waters of the Amur Bay from 2019 to 2024 are presented. The main requirements for AI tools that should ensure the interaction of functionalities and the comprehensiveness of the execution of the entire mission of the multi-agent system are discussed. These tools provide a higher level of AI and are approaching the field of development of strong AI tools.

Keywords: UAV multi-agent system, artificial intelligence tools, segmentation, neural networks, deep learning, monitoring oil spills, eliminating oil films.

Funding: The work was supported by the project of the state assignment of the Federal Agency for Maritime and River Transport No. 110-00022-21-00

For citation: Dmitriy Yu. Proshchenko, Denis A. Korovetsky, Alexey A. Chekhlenok, Dmitriy S. Bobylev, Oleg A., Bukin. Adaptation of artificial intelligence tools into framework of marine robotics in the tasks of ensuring environmental safety of marine waters during oil spills. Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 166—176. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.017.

Введение

Разработка, адаптация и интеграция элементов искусственного интеллекта в программные оболочки беспилотных воздушных судов (БВС) значительно расширяют круг задач, и обеспечивают автономность их выполнения. Миссия обеспечения экологической безопасности морских акваторий является комплексной и включает в себя несколько функционалов. Основными функционалами, которые обеспечивают выполнение данной миссии с использованием БВС являются: функционал мониторинга морской поверхности и функционал ликвидации плёнок нефтепродуктов. Исполнения каждого функционала мультиагентной системы подразумевает выполнение определённых мероприятий (функций), для выполнения которых необходимо использовать элементы искусственного интеллекта. Требования к отдельным элементам ИИ для выполнения узкоспециализированных задач одиночными БВС приведены в работах [1,2]. В этих работах описан аппаратно-программный комплекс морских роботов и первый опыт практического применения новой технологии обеспечения экологической безопасности морских акваторий от возможных загрязнений нефтепродуктами.

Кроме функционалов основной миссии мультиагентной системы, необходима разработка инструментов ИИ, которые обеспечивают навигацию всех элементов системы и их взаимодействие. В настоящей работе приводится описание узкоспециализированных элементов ИИ, которые обеспечивают выполнение основных функционалов миссии обеспечения экологической безопасности в случае разливов нефтепродуктов в море, с использованием БВС.

В отличие от миссии одиночных БВС, где достаточным является использование узкоспециализированных инструментов искусственного интеллекта (или инструментов слабого искусственного интеллекта), направленных на решение одной конкретной задачи, в мультиагентных системах требуется использование нейронных сетей и методов глубокого обучения, которые обеспечивают решение сразу нескольких задач и принятие решений по изменению маршрутов агентов, изменению или корректировке выполняемых функций и процесса взаимодействия агентов. Т.е. необходимы инструменты, которые относятся уже к области сильного искусственного интеллекта. И в настоящее время самым передовым краем разработок в мультиагентных системах, являются именно такие инструменты искусственного

интеллекта. Однако, для их разработки требуются узкоспециализированные инструменты ИИ, которые прошли практическое тестирование.

Наиболее успешным сектором гражданского приложения мультиагентных систем является сельское хозяйство [3]. Есть примеры использования мультиагентных систем БВС при мониторинге обстановки в ходе стихийных бедствий [4], при транспортировке полезных грузов до требуемого пункта назначения [5], при обеспечении экологической безопасности окружающей среды [6] и поиске источников антропогенных загрязнений атмосферы [7].

Во всех перечисленных выше приложениях, успешное выполнение миссий мультиагентными системами обеспечивает использование специализированных элементов искусственного интеллекта. Для корректировки маршрута каждого агента системы, правильного учёта изменений окружающей среды, внесение изменений в процесс взаимодействия агентов системы разрабатываются и интегрируются в программные оболочки навигации мультиагентной системы специализированные нейронные сети и используются методы глубокого обучения.

Однако, к настоящему времени, в морских гражданских приложениях используются в основном одиночные дроны. В научной литературе описаны примеры использования БВС: для решения задач по картографированию островов [8], мониторингу и предупреждению биологических опасностей [9], предотвращению и ликвидации последствий стихийных и техногенных морских катастроф [10,11], анализу физических параметров морской поверхности [12], обнаружению и оценке пространственно-временного распределения антропогенного мусора [13], мониторингу аквакультурных зон и процесса рыболовства в режиме реального времени [14], анализу различных морских экосистем и морской фауны (например, коралловых рифов, ледников, водно-болотных угодий и мангровых зарослей, оценка здоровья и биологических характеристик исследуемых животных) [15-17]. Во всех этих работах в той или иной мере проведена адаптация существующих инструментов ИИ или разработка новых для выполнения узкоспециализированных миссий БВС.

Особую перспективу имеют БВС в морском нефтегазовом секторе в плане мониторинга окружающей среды, при обнаружении разливов нефти и выявлению источников утечек нефтепродуктов. В основном такие работы посвящены мониторингу нефтяных плёнок при

добыче и транспортировке нефтепродуктов. Актуальными являются разработки БВС для мониторинга морских акваторий вокруг морских нефтедобывающих и буровых платформ, когда необходимо осуществлять постоянный мониторинг окружающей среды [18,19].

Разработка теоретических концепций использования мультиагентных систем БВС для мониторинга и ликвидации загрязнений морских поверхностей нефтепродуктами приведена в работах [20-22], где исследуется теоретическая часть динамической очистки нефтяных разливов и предложена концепция по использованию системы автономных аппаратно-программных комплексов на основе БВС, предназначенных для очистки морской поверхности путем распыления диспергентов. Результаты первой практической реализации мультиагентной системы БВС, которая объединяет в себе функционал мониторинга и ликвидации плёнок нефтепродуктов на морской поверхности, были описаны в работе [2]. Разработка новых и адаптация уже существующих элементов ИИ позволяет выполнять новые функции мультиагентной системой, как в части мониторинга, так и в части ликвидации плёнок нефтепродуктов на морской поверхности. В данной статье приведены результаты разработки и адаптации элементов ИИ для мультиагентной системы БВС, предназначенной для мониторинга и ликвидации разливов нефтепродуктов. В частности, описываются:

- элемент детектирования (первичной сегментации) пятна, и процесс его обучения на изображениях реальных разливов нефтепродуктов;
- элемент вторичной сегментации пятна, позволяющий оценить объём нефтепродукта в пятне и рассчитать необходимое количество диспергента для его ликвидации;
- элемент искусственного интеллекта и процесс его обучения для распознавания сортов нефтепродуктов по спектрам лазерной индуцированной флуоресценции.

Элементы искусственного интеллекта мультиагентной системы БВС для мониторинга разливов нефтепродуктов на морской поверхности

Детектирование (первичная сегментация) нефтяного пятна - первый элемент ИИ мультиагентной системы, должен выполнить детектирование (обнаружение) пятна нефтепродуктов на морской поверхности и определить внешние и внутренние границы пятна, т.е. оконтурить пятно. В компьютерное зрение БВС мониторинга интегрируется элемент искусственного интеллекта, который обучен обнаруживать пятно на поверхности воды и определять контуры пятна, т.е. осуществлять сегментацию всего пятна, выделив его границы (первичная сегментация). Функционал этого элемента объединяются сразу два этапа –

детектирование пятна и выделение его контура на поверхности.

Работу компьютерного зрения БВС мониторинга обеспечивает видекамера IMX219, работающая совместно с бортовым компьютером NVIDIA JETSON с программным обеспечением ROS. При обнаружении нефтяного пятна область на изображении обводится по контуру обнаруженного объекта. Полученное изображение анализируется алгоритмом, который обучен для распознавания нефтяного пятна на поверхности моря и проведения сегментации пятен. Анализируемое пятно выделяется в виде оконтуренного сегмента на изображении.

Для решения задачи распознавания (семантической сегментации [23]) нужен элемент ИИ в виде программного компонента, с использованием в качестве алгоритма соответствующей нейросетевой архитектуры, позволяющий производить анализ изображений и видео. Для создания этого программного компонента использовалась нейронная сеть Mask R-CNN [24], и язык программирования Python. Для работы с изображениями плёнок использовалась библиотека алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения с открытым кодом OpenCV. В качестве системы реализации компонента элемента Recognition Algorithm для объектной сегментации была выбрана Mask R-CNN, имплементированная с помощью библиотеки Keras с фреймворком Tensorflow.

Набор изображений был использован для обучения элемента ИИ на анализ изображений и обнаружение нефтяных разливов на морской поверхности. Использовались свёрточные нейронные сети и метод обучение с учителем.

Необходимый для обучения алгоритма архив изображений (датасет) включал в себя более 3000 изображений реальных разливов нефтепродуктов, полученных из фото и видео. Они были получены при мониторинге залива Петра Великого в период с 2018 по 2024 г.г. Архив изображений включал в себя как отдельные фотоснимки разных разливов, так и последовательности кадров одного и того же разлива, полученные с видео. Последнее, позволяло обучать элемент ИИ распознавать пятна, видимые под различными углами к надиру.

В процессе формирования датасета на всех изображениях производилось выделение областей с видимыми нефтяными загрязнениями. Было произведено более качественное дообучение алгоритма сегментации, на изображениях, которые не были включены в Data set, что позволило повысить точность алгоритма. На рис. 1 приведён пример первичной сегментации (детектирования) нефтяного пятна с использованием созданного элемента ИИ детектирования. Таким образом, первичная сегментация заключалась в определении внешнего и внутренних контуров нефтяного пятна.

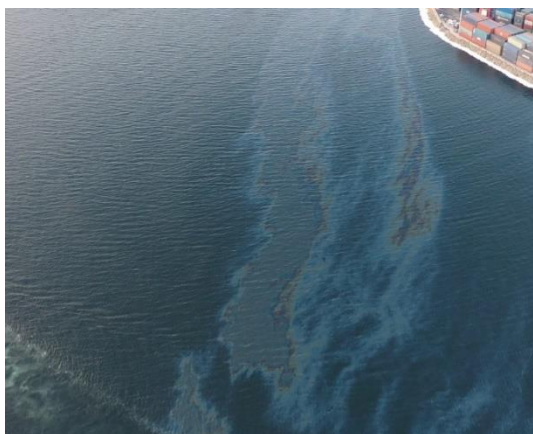


Рис.1а. Оригинальное изображение

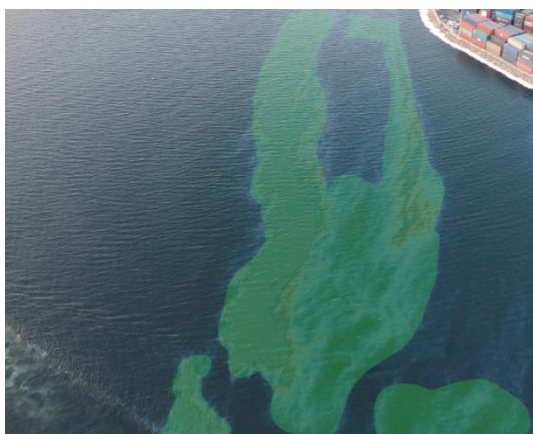


Рис.1б. Первичная сегментация изображения плёнки

С течением времени пятна могут смещаться и менять свою форму и размеры. В Data Set были включены изображения, которые представляют собой различные стадии динамики пятна. Пятно смещается и меняет свою форму под воздействием ветра или поверхностных течений. Это с одной стороны позволило увеличить число изображений в Data Set, а с другой стороны начать разработку методов обучения нейронных сетей, которые позволяют распознавать динамику пятен и воспроизводить эволюцию нефтяного разлива с течением времени. Это является важным при определении источников загрязнения. На рис.2 приведён пример пятна, которое находилось в области поверхностных течений и меняло свою форму и размеры (2а – не обработанный снимок, 2б – первичная сегментация изображения). Анализ последовательной динамики формы пятна позволяет проводить тонкую настройку процесса глубокого обучения нейронных сетей для более точной первичной сегментации плёнок нефтепродуктов. И разрабатывать процесс глубокого обучения нейронных сетей для восстановления истории развития пятна под воздействием внешних условий и определения таким образом возможных источников загрязнения.

Анализ результатов детектирования тех пятен нефтепродуктов, которые не были включены в обучающий Data Set (таких пятен было использовано порядка 150), позволил оценить точность (правильность) первичной сегментации. Точность сегментирования оценивалась как относительная

разница в площади между истинным значением – S_t и площадью сегмента, который выделил этот элемент ИИ – S_s :

$$\Delta = [1 - |S_t - S_s| / S_t] \times 100\% \quad (1)$$

при $S_s > 2S_t$ значение Δ приравнивается к нулю.

Для проанализированных пятен реальных разливов, которые были зарегистрированы нами за период мониторинга, диапазон значений Δ составил 60 – 90%. Наименьшие значения Δ соответствовали разливам лёгких сортов судового топлива, при наличии ветра со скоростями более 5 м/сек. На поверхности воды наблюдалась мелкомасштабная рябь (пример рис.1а), по краям пятна наблюдались тонкие и длинные структуры, типа филаментов, а внутри пятен наблюдались поверхности чистой воды. Максимальные значения Δ соответствовали плёнкам нефтепродуктов, мониторинг которых проводился при штиле, либо при слабом ветре.



Рис. 2а. Оригинальное изображение разлива в области поверхностного течения

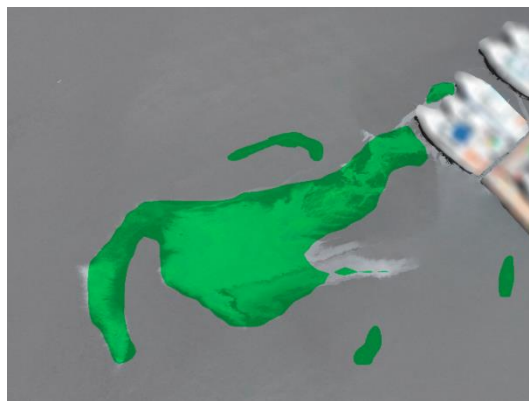


Рис. 2б. Первичная сегментация пятна в области течения

При известных сортах нефтепродукта и температуре морской поверхности, результат работы элемента первичной сегментации уже даёт возможность осуществить оценку объёмов разлива. Дальнейшее повышение точности первичной сегментации связано с увеличением количества изображений в Data Set и дообучением нейронной сети.

Вторичная сегментация (сегментация по цветовым кодам) нефтяного пятна это следующий шаг в выполнении миссии обеспечения

экологической безопасности при разливах нефтепродуктов – ликвидация методом распыления диспергентов. Для этого необходимо провести вторичную сегментацию всего пятна. Разделить плёнку нефтепродуктов на сегменты, которые соответствуют одинаковой толщине. От толщины плёнки сегмента зависит тот объём диспергента, который необходимо распылить для его уничтожения. Мы использовали для вторичной сегментации изображения нефтяного пятна метод, принятый в Боннском соглашении [25,26]. Вторичная сегментация пятна достигается глубоким обучением нейронной сети и созданием соответствующего Data Set изображений плёнок нефтепродуктов для обучения. Вторичная сегментация пятна осуществляется следующим образом. Уже выделенная первичной сегментацией область должна быть разбита на несколько других, относящихся к цветовым кодам, на которые раскладывается её видимое цветное изображение (это коды, относящиеся к видимым цветам и оттенкам цвета изображения – кодам sheen, rainbow и metallic). На данной стадии обучения мы использовали только три этих цветовых кода. Диапазон толщин каждого цвета приведены в табл. 1 [25]. Анализируется цвет каждого пикселя в выделенной области. Выделив пиксели относящиеся к радужному (rainbow) и посчитав их количество, можно сказать какую часть от общей области занимает радужная плёнка. Оставшуюся часть можно разделить по оттенку на более светлую и более темную области и оценить их соотношение, это будут блестящий (sheen) и металлический (metallic) коды, соответственно. Пример такой сегментации показан на рис. 3 (красный цвет соответствует цветовому коду sheen, зелёный – rainbow, а синий - metallic).



Рис. 3а. Вторичная сегментация пятна, изображённого на рис. 1а, по цветовым кодам

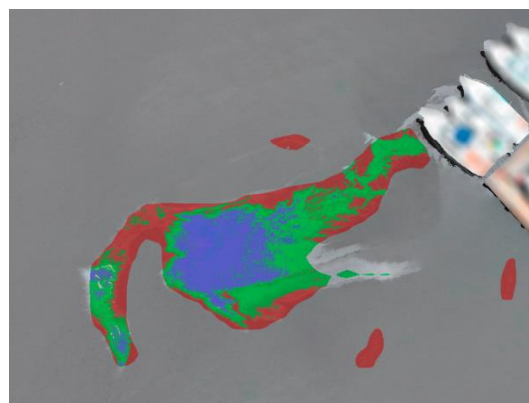


Рис. 3б. Вторичная сегментация пятна, изображённого на рис. 2 а, по цветовым кодам

Таблица 1

Коды цветового изображения плёнки

Код	Представление Кода внешнего вида	Интервал толщин (μm)	Объём разлива (литр на km^2)
1	блестящий (серебристо- серый – на рисунках соответствует красному)	0.04 to 0.3	40 – 300
2	радужный (проявляется в виде набора нескольких цветов, на рисунке- зелёный)	0.3 to 5.0	300 – 5000
3	Оттенок металлического цвета (на рисунке – синий)	5.0 to 50	5.000 – 50.000

Таким образом, выделенная на морской поверхности область пятна разбивается на сегменты равной толщины, которым приписывается определённые цвета. Сегментация по цветам, проведённая для двух, описанных выше разливов судового топлива, представлены на рис. 3 а, б.

Вторичная сегментация позволяет рассчитать объём диспергента, который необходим для ликвидации плёнки в каждом сегменте. Необходимо отметить, что выделенные области одинаковой толщины представляют собой связанные участки поверхности, только в случае отсутствия мелкомасштабной ряби на ней, когда сила ветра менее 5 м/сек или при штиле. В случае более сильного ветра и присутствия «ряби» на поверхности задача определения объёмов и траектории распыления усложняется. И необходимо включать в программу управления объёмами распыления для БВС ликвидации плёнки дополнительные программные блоки, которые должны учесть наличие такой сложной структуры в распределении участков одинаковой толщины по поверхности плёнки. В этом случае необходима разработка элементов ИИ более высокого уровня, которые включают в себя несколько узкоспециализированных нейронных сетей и способны принимать решения по изменению маршрутов движения отдельных агентов системы и учитывать динамику формы и положения пятна под воздействием внешних условий.

Процедура вторичной сегментации по цветовым кодам проводилась для участков изображений, которые находятся под углами близкими к надиру при проведении съёмки (не более 40° к направлению надира).

Схема работы функционалов ИИ первичной и вторичной сегментации представлена на рис.4.

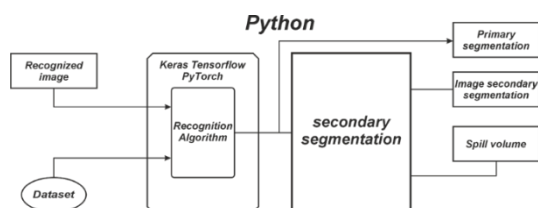


Рис. 4. Функциональная схема элементов первичной и вторичной сегментации

Элемент ИИ для ЛИФ спектрометрии агентов мониторинга мультиагентной системы БВС – следующий специализированный инструмент ИИ, входящий в функционал мониторинга, выполняет лазерную флуориметрию нефтепродуктов в плёнке для проведения идентификации сортов судового топлива и разработки новых методов оценки ущерба, который наносится фитопланктонным сообществам загрязнениями нефтепродуктами и диспергентами, которые используются для их ликвидации.

В рассматриваемой мультиагентной системе предусмотрено, что БВС мониторинга может оснащаться лазерным флуориметром. При посадке на воду может проводиться измерение спектров флуоресценции морской воды, прямо под плёнкой, либо в непосредственной близости от неё. Процедура измерения спектров, методика и непосредственно лазерный флуориметр описаны в работах [27,28]. Дальнейшее развитие данной методики было проведено в направлении расширения архива спектров ЛИФ от нефтепродуктов и использовании наиболее эффективных (для этих задач) методов глубокого обучения. Проводились лабораторные исследования спектров ЛИФ на различных этапах деградации и выветривания плёнок нефтепродуктов. Из полученных данных составлялся Data Set, который использовался для проведения машинного обучения распознавания сортов нефтепродуктов, находящихся в плёнке или растворе морской воды. Был проведён анализ существующих алгоритмов машинного обучения для задач классификации спектров индуцированной флуоресценции морской воды с растворёнными нефтепродуктами. Анализ проведён с использованием метода k-fold cross-validation [29]. Он показал, что наиболее оптимальными алгоритмами для задач классификации спектров индуцированной флуоресценции являются алгоритмы Linear Discriminant Analysis (LDA) [30] и Linear Support Vector Machines (LinearSVC) [31].

Важным аспектом является возможность использования данных алгоритмов на относительно низкопроизводительных процессорных платах. Это позволяет с их помощью реализовывать компактные аппаратно-программные комплексы для применения на БВС.

Анализ экспериментов в лабораторном бассейне показал, что алгоритм распознавания с большой вероятностью идентифицирует сорта растворённых нефтепродуктов под плёнкой и находящихся на спокойной поверхности. Это справедливо если ЛИФ проводился в течении не более чем несколько часов с момента появления плёнки для лёгких сортов судового топлива и не более 2 суток для тяжёлых сортов и в условиях отсутствия прямой солнечной засветки.

В процессе деградации со временем, характерные особенности спектров ЛИФ для разных сортов изменяются и алгоритмы распознавания снижают точность определения отдельных сортов нефти. Спектры ЛИФ деградированного нефтепродукта отличаются от спектров, полученных в лаборатории, эталонных спектров. Актуальным для выполнения этого функционала остаётся создание Data Set спектров ЛИФ, полученных в натурных условиях с различной степенью деградации. БВС мониторинга с лазерным спектрометром является оптимальным инструментом для выполнения этой задачи. Это повысит точность процесса идентификации независимо от степени деградации разлива нефтепродукта.

Массивы спектров различных типов нефтепродуктов использовались при составлении Data Set для извлечения из них признаков. Сформированная из признаков описаний матрица данных использовалась для обучения методов LDA и LinearSVC. Пример работы созданной модели в случае использования алгоритма LinearSVC представлен на рисунке 5а. В качестве тестовых спектров были взяты 30 спектральных характеристик растворов тяжелого судового топлива типа RMB30 с различной концентрацией. Спектры получены в лабораторных условиях и не использовались в процессе обучения. На рисунке 5b продемонстрированы спектры данного типа топлива с различной концентрацией, полученные в ходе лабораторных экспериментов. По горизонтальной оси (рис. 5а) отложены сорта судового топлива, по вертикальной оси – вероятности того, что данные спектры соответствуют указанному типу судового топлива. Вероятность того, что плёнка образована разливом судового топлива RMB 30 превышает 80%. В данном случае идентификации сорта топлива алгоритм LinearSVC показывает хорошие результаты.

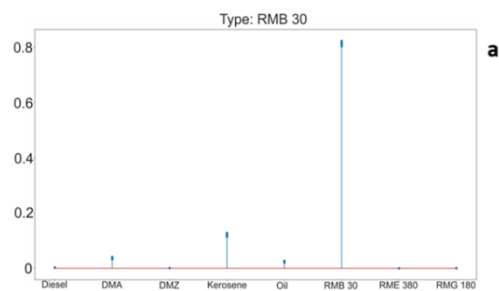


Рис. 5. а - распределение вероятности соответствия случайно выбранных 30 спектров растворов топлива RMB30 с различной концентрацией в случае алгоритма LinearSVC

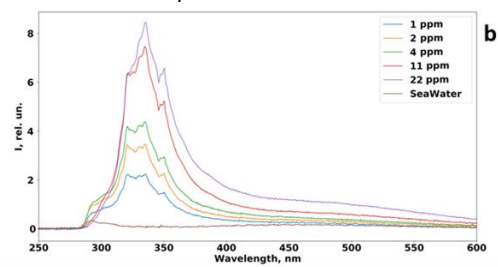


Рис. 5b. б - спектры индуцированной флуоресценции растворов судового топлива RMB 30 с разной концентрацией

Функционал ликвидации разливов нефтепродуктов мультиагентной системой БВС методом распыления диспергентов

Основным результатом выполнения этого функционала является распыление диспергентов на поверхность плёнки нефтепродуктов в соответствии с толщиной каждого сегмента, на которое разбивается плёнка в результате вторичной сегментации. Описание специализированного БВС, системы распыления и результаты его тестирования в натурных условиях приведены в работах [1,2]. Были внесены изменения в конструкцию БВС, что позволило увеличить объём диспергента до 20 литров. БВС с миссией ликвидации плёнок был использован на акватории Амурского залива в системе с БВС мониторинга для ликвидации разливов небольшого масштаба, которые имели место при бункеровке судов и яхт. На рис. 6 приведен пример детектирования, вторичной сегментации плёнки (рис.6а) и маршрут БВС при распылении диспергентов (рис.6б).

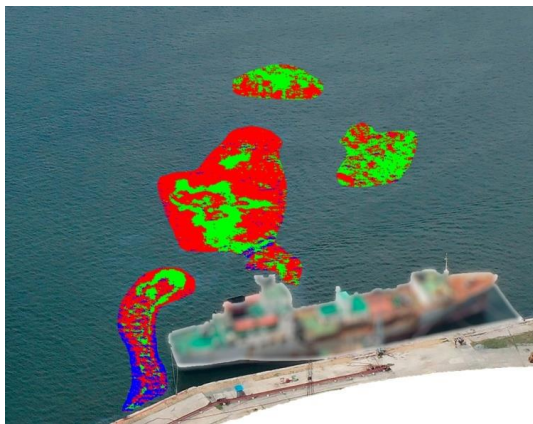


Рис.6а. Вторичная сегментация нефтяных плёнок разлива нефтепродуктов



Рис.6б. Маршрут БВС при распылении диспергентов

На рис. 6а, как и ранее, красные пиксели соответствуют цветовому коду sheen, зелёный – коду rainbow и синий - metallic. На основе полученного распределения цветовых кодов по поверхности пятен был рассчитан объём распыляемого диспергента над каждым сегментом и оптимальный маршрут БВС для распыления диспергента. Объём распыляемого диспергента определялся из соотношения объёма диспергента к объёму нефтепродукта 1:10. Распылялся диспергент марки Unitor™ Seacare OSD-2™, рекомендованный к

использованию. Объём распыляемого диспергента над каждым выделенным сегментом изменялся путём регулирования давления в системе распыления.

Оценка точности первичной сегментации, рассчитанная по формуле (1), составила величину порядка 65%. Разлив судового топлива представлял собой последовательность отдельных пятен. В каждом пятне были рассчитаны площади сегментов, которые соответствовали цветовым кодам. Толщина сегментов в каждом цветовом коде определялась как среднее значение диапазона толщин, которые приведены в таблице 1. Общий объём судового топлива, разлитого на поверхности, оценивался в 42 литра. Распыление диспергентов проводилось с высоты порядка 7 метров, так чтобы размер пятна диспергента на поверхности плёнки нефтепродуктов составляло 6 метров. Распыляющие форсунки располагаются непосредственно под винтами. И выбранная высота является оптимальной, для того чтобы направлять диспергент в расчётные области сегментов, используя нисходящие воздушные потоки от винтов БВС. Это остаётся справедливым для скоростей ветра не более 5 м / сек. При больших скоростях ветра необходимо корректировать высоту полёта. Расчёт траектории полёта БВС осуществлялся с использованием программы “Mission planner”, интегрированной к элементу ИИ, который разрабатывает, контролирует миссию ликвидации нефтяного разлива и рассчитывает точки полёта БВС, в которых необходимо изменять интенсивность распыления диспергентов.

Общая длительность выполнения функционала ликвидации разлива нефтепродуктов составила 20 минут, при средней скорости полёта БВС порядка 20 км/час. Расчётный маршрут полёта БВС показан на рис. 6б. Распыление диспергента проводилось в безветренную погоду и при отсутствии поверхностных течений. Объём диспергента, распылённого на всю площадь разлива составил 5 литров.

Заключение

В данной работе мы привели результаты разработок и адаптации элементов ИИ для решения только трёх узкоспециализированных задач мониторинга и ликвидации плёнок нефтепродуктов. Специализированных нейронных сетей для детектирования и сегментации всего пятна или вторичной сегментации по цветовому коду изображения плёнки. Метод глубокого обучения, адаптирован для обучения распознавания сортов нефтепродуктов по спектрам ЛИФ. Правильность и точность специализированных методов ИИ протестирована на реальных разливах нефтепродуктов. Эти инструменты выполняют конкретные узкоспециализированные задачи, однако они являются базовыми для проведения дальнейшей разработки инструментов ИИ, которые позволят выполнять всю комплексную миссию обеспечения экологической безопасности при разливах нефтепродуктов. Для автономного и оперативного выполнения всей комплексной миссии, требуется объединение результатов каждой узкоспециализированной нейронной сети, и разработка новых, которые объединяют узкоспециализированные и на новом уровне

анализируют, принимают решения относительно корректировки миссии. Такие методы представляют собой уже инструменты сильного искусственного интеллекта (AGI). Следовательно, дальнейшая разработка элементов ИИ для комплексного решения данной задачи лежит уже в области создания инструментов сильного ИИ.

Особенно это относится к элементу искусственного интеллекта, который разрабатывает навигацию БВС мониторинга и ликвидации нефтяного пятна. В условиях слабого ветра и отсутствия поверхностных течений, пятно остаётся стационарным длительное время, которого хватает на то, чтобы осуществить первичную и вторичную сегментацию пятен, рассчитать необходимые объёмы диспергентов для ликвидации каждого сегмента плёнки и разработать наиболее оптимальный маршрут БВС для распыления диспергентов. Однако, в случае ветра со скоростью более 5 м/сек или наличия поверхностных течений, необходима постоянная корректировка этих

расчётов. Для решения такой задачи в настоящее время проводится разработка новых комплексных методов глубокого обучения, которые позволят осуществлять синтез работы несколько узкоспециализированных нейронных сетей, вносить коррективы в расчёт маршрута и принимать решение относительно процесса распыления диспергентов по результатам анализа нейронных сетей, обслуживающих процесс мониторинга.

Дальнейшая разработка элементов ИИ, представленных в данной статье, имеет потенциал расширения и создания комплексного инструмента более высокого уровня. По своим функциональным возможностям это будут уже инструменты сильного ИИ с возможностью решения комплексных задач, включающих как мониторинг, ликвидацию пятен нефтепродуктов, так и принятие решений относительно корректировки навигации каждого элемента системы и учёта условий окружающей среды.

Литература

1. Букин О.А., Коровецкий Д.А., Чехленок А.А., Проценко Д.Ю., Юрчик В.Ф., Кривотулов А.М., Пяк Е.А. Разработка новой технологии мониторинга и ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов на морской поверхности с использованием беспилотных воздушных судов (БВС). Морские Интеллектуальные Технологии. 2022. № 3. часть 1. 160 – 170 с.
2. Проценко Д.Ю., Коровецкий Д.А., Букин И.О., Чехленок А.А., Бобылев Д.С., Юрчик В.Ф., Букин О.А. Мультиагентный роботизированный комплекс экологического мониторинга морских акваторий. Морские интеллектуальные технологии. 2024, № 3, часть 1, 189-199 с.
3. Marwah N. et al. An analysis of the robustness of AUV agriculture field coverage using multi-agent reinforcement learning. International Journal of Information Technology. 2023, v. 15, # 4, p. 2317-2327. <https://doi.org/10.1007/s41870-023-01264-0>
4. Vallejo D. et al. Multi-agent architecture for information retrieval and intelligent monitoring by UAVs in known environments affected by catastrophes. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2020, v.87, p.103243. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103243>
5. Su Y. H., Bhowmick P., Lanzon A. A robust adaptive formation control methodology for networked multi-UAV systems with applications to cooperative payload transportation Control Engineering Practice. 2023, v, 138. p. 105608. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105608>
6. Bezborodova O. E., Bodin O. N., Polosin V. G. Monitoring of Environmental Safety of the Territorial Technosphere on the Basis of Multi-Agent Technology. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2018. p. 1-6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602540>
7. Saadaoui H., El Bouanani F. A local PSO-based algorithm for cooperative multi-UAV pollution source localization. IEEE Access, 2022, v. 10, p. 106436-106450. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3212079>
8. Casella E. et al. Accuracy of sand beach topography surveying by drones and photogrammetry. Geo-Marine Letters. 2020, 40: 255-268. <https://doi.org/10.1007/s00367-020-00638-8>
9. Cheng K. H., Chan S. N., Lee J. H. W. Remote sensing of coastal algal blooms using unmanned aerial vehicles (UAVs). Marine Pollution Bulletin. 2020, v, 152. P, 110889. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110889>
10. Rezaldi M. Y. et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) and photogrammetric technic for 3d tsunamis safety modeling in cilacap, indonesia. Applied Sciences. 2021, v. 11, # 23, p. 11310. <https://doi.org/10.3390/app112311310>
11. Asadzadeh S., de Oliveira W. J., de Souza Filho C. R. AUV-based remote sensing for the petroleum industry and environmental monitoring: State-of-the-art and perspectives Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022, v. 208, p. 109633 <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109633>
12. Koparan C. et al. In situ water quality measurements using an unmanned aerial vehicle (UAV) system. Water. 2018, v. 10, #. 3, p. 264 <https://doi.org/10.3390/w10030264>
13. Baisi M. et al. High-resolution aerial detection of marine plastic litter by hyperspectral sensing. Remote Sensing. 2021. v. 13. v. 8. p. 1557. <https://doi.org/10.3390/rs13081557>
14. Yang M. D. et al. Timely and quantitative damage assessment of oyster racks using UAV images, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2018. v. 11. #. 8. p. 2862-2868. <https://doi.org/10.3390/w10030264>
15. Raoult V. et al. Operational protocols for the use of drones in marine animal research Drones. 2020. v. 4. #. 4. p. 64. <https://doi.org/10.3390/drones4040064>
16. Gaffey C., Bhardwaj A. Applications of unmanned aerial vehicles in cryosphere: Latest advances and prospects. Remote Sensing. 2020. v. 12. #. 6. p. 948 <https://doi.org/10.3390/rs12060948>
17. Ventura D. et al. Mapping and classification of ecologically sensitive marine habitats using unmanned aerial vehicle (UAV) imagery and object-based image analysis (OBIA) Remote Sensing. 2018. v. 10. #. 9. p. 1331 <https://doi.org/10.3390/rs10091331>

18. Yang Z., Yu, X., Dedman S., Rosso M., Zhu J., Yang J., Wang J. UAV remote sensing applications in marine monitoring: Knowledge visualization and review. *Science of The Total Environment*. 2022. v. 838. p. 155939. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155939>
19. Asadzadeh S., de Oliveira W. J., de Souza Filho C. R. UAV-based remote sensing for the petroleum industry and environmental monitoring: State-of-the-art and perspectives *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. v. 208. p. 109633. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109633>
20. Chamoso P. et al. Modeling oil-spill detection with multirotor systems based on multi-agent systems. 17th International conference on information fusion (FUSION). IEEE. 2014, p. 1-8. <https://doi.org/10.3233/ICA-2010-0332>
21. Kaviri S., Tahsiri A., Taghirad H. D. Coverage control of multi-robot system for dynamic cleaning of oil spills. 2019 7th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM). IEEE. 2019, p. 17-22. doi: 10.1109/ICRoM48714.2019.9071805
22. Kaviri S., Tahsiri A., Taghirad H. D. A cooperative control framework of multiple unmanned aerial vehicles for dynamic oil spill cleanup. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021, v. 43. #. 6. p. 289 <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03005-5>
23. Guo Y. et al. A review of semantic segmentation using deep neural networks. *International journal of multimedia information retrieval*. 2018 v. 7, p. 87-93. <https://doi.org/10.1007/s13735-017-0141-z>
24. Bharati P., Pramanik A. Deep learning techniques—R-CNN to mask R-CNN: a survey *Computational Intelligence in Pattern Recognition: Proceedings of CIPR 2019*. 2020. p. 657-668 https://doi.org/10.1007/978-981-13-9042-5_56
25. Bonn Agreement Aerial Operations Handbook, 2016. https://www.bonnagreement.org/site/assets/files/1081/aerial_operations_handbook.pdf
26. Lewis A. The development and use of the Bonn Agreement oil appearance code (BAOAC) *Proceedings of the Interspill Conference, Cedre, France*. 2009, p. 12-14. https://www.interspill.org/downloads/archive/1100_lewis.pdf
27. Bukin O., Proshchenko D., Korovetskiy D., Chekhlenok A., Yurchik V., Bukin I. Development of the artificial intelligence and optical sensing methods for oil pollution monitoring of the sea by drones // *Applied Sciences*. 2021, v. 11, #. 8. p. 3642 <https://doi.org/10.3390/app11083642>
28. Bukin O., Proshchenko D., Alexey C., Korovetskiy D., Bukin I., Yurchik, V., Sokolova I., Nadezhkin, A. New solutions of laser-induced fluorescence for oil pollution monitoring at sea. *Photonics*. MDPI, 2020. v. 7, # 2, p. 36. <https://doi.org/10.3390/photonics7020036>
29. Yadav S., Shukla S. Analysis of k-fold cross-validation over hold-out validation on colossal datasets for quality classification 2016 IEEE 6th International conference on advanced computing (IACC). IEEE, 2016. p. 78-83. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7544814/citations?tabFilter=papers#citations>
30. Tharwat A. et al. Linear discriminant analysis: A detailed tutorial. *AI communications*. 2017, v. 30, #2, p. 169-190. <https://doi.org/10.3233/AIC-170729>
31. Rosipal R., Trejo L. J., Matthews B. Kernel PLS-SVC for linear and nonlinear classification. *Proceedings of the 20th International Conference on Machine Learning (ICML-03)*. 2003, p. 640-647. <https://www.ofai.at/~roman.rosipal/Papers/icml03.pdf>

References

1. Oleg A. Bukin, Denis A. Korovetsky, Alexey A. Chekhlenok, Dmitriy Y. Proshchenko, Victoria F. Yurchik, Andrey M. Krivotulov, Elena A. Pyak. Development of a new technology for monitoring and elimination of emergency oil spills on the sea surface using unmanned aerial vehicles (UAVs). *Marine intellectual technologies*. 2022. № 3 part 1. P. 160—169.
2. Dmitriy Yu. Proshchenko, Denis A. Korovetsky, Ilya O. Bukin, Aleksey A. Chekhlenok, Dmitrii S. Bobylev, Viktoriya F. Yurchik, Oleg A. Bukin. Multi-agent robotic complex for environmental monitoring of marine areas. *Marine intellectual technologies*. 2024. № 3 part 1, P. 189—199. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.040
3. Marwah N. et al. An analysis of the robustness of UAV agriculture field coverage using multi-agent reinforcement learning. *International Journal of Information Technology*. 2023, v. 15, # 4, p. 2317-2327. <https://doi.org/10.1007/s41870-023-01264-0>
4. Vallejo D. et al. Multi-agent architecture for information retrieval and intelligent monitoring by AUVs in known environments affected by catastrophes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2020, v.87, p.103243. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103243>
5. Su Y. H., Bhowmick P., Lanzon A. A robust adaptive formation control methodology for networked multi-UAV systems with applications to cooperative payload transportation *Control Engineering Practice*. 2023, v, 138. p. 105608. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105608>
6. Bezborodova O. E., Bodin O. N., Polosin V. G. Monitoring of Environmental Safety of the Territorial Technosphere on the Basis of Multi-Agent Technology. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2018. p. 1-6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602540>
7. Saadaoui H., El Bouanani F. A local PSO-based algorithm for cooperative multi-UAV pollution source localization. *IEEE Access*, 2022, v. 10, p. 106436-106450. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3212079>
8. Casella E. et al. Accuracy of sand beach topography surveying by drones and photogrammetry. *Geo-Marine Letters*. 2020, 40: 255-268. <https://doi.org/10.1007/s00367-020-00638-8>
9. Cheng K. H., Chan S. N., Lee J. H. W. Remote sensing of coastal algal blooms using unmanned aerial vehicles (UAVs). *Marine Pollution Bulletin*. 2020, v, 152. P. 110889. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110889>
10. Rezaldi M. Y. et al. Unmanned aerial vehicle (AUV) and photogrammetric technic for 3d tsunamis safety modeling in cilacap, indonesia. *Applied Sciences*. 2021, v. 11, # 23, p. 11310. <https://doi.org/10.3390/app112311310>

11. Asadzadeh S., de Oliveira W. J., de Souza Filho C. R. UAV-based remote sensing for the petroleum industry and environmental monitoring: State-of-the-art and perspectives Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022, v. 208, p. 109633 <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109633>
12. Koparan C. et al. In situ water quality measurements using an unmanned aerial vehicle (AUV) system. Water. 2018, v. 10, #. 3, p. 264 <https://doi.org/10.3390/w10030264>
13. Balsi M. et al. High-resolution aerial detection of marine plastic litter by hyperspectral sensing. Remote Sensing. 2021. v. 13. v. 8. p. 1557. <https://doi.org/10.3390/rs13081557>
14. Yang M. D. et al. Timely and quantitative damage assessment of oyster racks using AUV images, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2018. v. 11. #. 8. p. 2862-2868. <https://doi.org/10.3390/w10030264>
15. Raoult V. et al. Operational protocols for the use of drones in marine animal research Drones. 2020. v. 4. #. 4. p. 64. <https://doi.org/10.3390/drones4040064>
16. Gaffey C., Bhardwaj A. Applications of unmanned aerial vehicles in cryosphere: Latest advances and prospects. Remote Sensing. 2020. v. 12. #. 6. p. 948 <https://doi.org/10.3390/rs12060948>
17. Ventura D. et al. Mapping and classification of ecologically sensitive marine habitats using unmanned aerial vehicle (UAV) imagery and object-based image analysis (OBIA) Remote Sensing. 2018. v. 10. #. 9. p. 1331 <https://doi.org/10.3390/rs10091331>
18. Yang Z., Yu, X., Dedman S., Rosso M., Zhu J., Yang J., Wang J. UAV remote sensing applications in marine monitoring: Knowledge visualization and review. Science of The Total Environment. 2022. v. 838. p. 155939. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155939>
19. Asadzadeh S., de Oliveira W. J., de Souza Filho C. R. UAV-based remote sensing for the petroleum industry and environmental monitoring: State-of-the-art and perspectives Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. v. 208. p. 109633. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109633>
20. Chamoso P. et al. Modeling oil-spill detection with multirotor systems based on multi-agent systems. 17th International conference on information fusion (FUSION). IEEE. 2014, p. 1-8. <https://doi.org/10.3233/ICA-2010-0332>
21. Kaviri S., Tahsiri A., Taghirad H. D. Coverage control of multi-robot system for dynamic cleaning of oil spills. 2019 7th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM). IEEE. 2019, p. 17-22. doi: 10.1109/ICRoM48714.2019.9071805
22. Kaviri S., Tahsiri A., Taghirad H. D. A cooperative control framework of multiple unmanned aerial vehicles for dynamic oil spill cleanup. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2021, v. 43. #. 6. p. 289 <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03005-5>
23. Guo Y. et al. A review of semantic segmentation using deep neural networks. International journal of multimedia information retrieval. 2018 v. 7, p. 87-93. <https://doi.org/10.1007/s13735-017-0141-z>
24. Bharati P., Pramanik A. Deep learning techniques—R-CNN to mask R-CNN: a survey Computational Intelligence in Pattern Recognition: Proceedings of CIPR 2019. 2020. p. 657-668 https://doi.org/10.1007/978-981-13-9042-5_56
25. Bonn Agreement Aerial Operations Handbook, 2016. https://www.bonnagreement.org/site/assets/files/1081/aerial_operations_handbook.pdf
26. Lewis A. The development and use of the Bonn Agreement oil appearance code (BAOAC) Proceedings of the Interspill Conference, Cedre, France. 2009, p. 12-14. https://www.interspill.org/downloads/archive/1100_lewis.pdf
27. Bukin O., Proschenko D., Korovetskiy D., Chekhlenok A., Yurchik V., Bukin I. Development of the artificial intelligence and optical sensing methods for oil pollution monitoring of the sea by drones //Applied Sciences. 2021, v. 11, #. 8. p. 3642 <https://doi.org/10.3390/app11083642>
28. Bukin O., Proschenko D., Alexey C., Korovetskiy D., Bukin I., Yurchik, V., Sokolova I., Nadezhkin, A. New solutions of laser-induced fluorescence for oil pollution monitoring at sea. Photonics. MDPI, 2020. v. 7, # 2, p. 36. <https://doi.org/10.3390/photonics7020036>
29. Yadav S., Shukla S. Analysis of k-fold cross-validation over hold-out validation on colossal datasets for quality classification 2016 IEEE 6th International conference on advanced computing (IACC). IEEE, 2016. p. 78-83. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7544814/citations?tabFilter=papers#citations>
30. Tharwat A. et al. Linear discriminant analysis: A detailed tutorial. AI communications. 2017, v. 30, #2, p. 169-190. <https://doi.org/10.3233/AIC-170729>
31. Rosipal R., Trejo L. J., Matthews B. Kernel PLS-SVC for linear and nonlinear classification. Proceedings of the 20th International Conference on Machine Learning (ICML-03).2003, p. 640-647. <https://www.ofai.at/~roman.rosipal/Papers/icml03.pdf>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Прощенко Дмитрий Юрьевич, кандидат физико-математических наук, директор научно-инновационного комплекса "Морской технопарк", Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059 Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а; e-mail: dima.prsk@mail.ru

Dmitriy Yu. Proschenko, Ph.D. (Eng), Director of the Research and Innovation Complex "Marine Technopark", "Marine Technopark", Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, 690059 Vladivostok, St. Verkhneportovaya, 50a; e-mail: dima.prsk@mail.ru

Коровецкий Денис Андреевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией морской робототехники научно-инновационного комплекса "Морской технопарк", Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059 Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а;

Чехленок Алексей Анатольевич, младший научный сотрудник лаборатории морской робототехники научно-инновационного комплекса "Морской технопарк", Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059 Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а; e-mail: dima.prsk@mail.ru

Бобылев Дмитрий Сергеевич, аспирант, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059 Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а; e-mail: d.bobylev@mail.ru

Букин Олег Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории морской робототехники "Морской технопарк", Морской государственный университет им. Г.И. Невельского, 690059 Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а; e-mail: o_bukin@mail.ru

Denis A. Korovetsky, Ph.D. (Eng), Chief Laboratory Marine Robotics, Research and Innovation Complex "Marine Technopark", Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, 690059 Vladivostok, St. Verkhneportovaya, 50a;

Aleksey A. Chekhlenok, Junior Researcher, Laboratory of Marine Robotics, Research and Innovation Complex "Marine Technopark", Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, 690059 Vladivostok, St. Verkhneportovaya, 50a; e-mail: dima.prsk@mail.ru

Dmitrii S. Bobylev, graduate student, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, 690059 Vladivostok, St. Verkhneportovaya, 50a; e-mail: d.bobylev@mail.ru

Oleg A. Bukin, Dr. Sci. (Eng), Professor, Chief researcher, Laboratory of Marine Robotics, Research and Innovation Complex "Marine Technopark", Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, 690059 Vladivostok, St. Verkhneportovaya, 50a; e-mail: o_bukin@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 09.07.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 12.11.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 20.12.2025.

Научная статья

УДК 004.896+629.58+001.891.57

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.018>**Метод оценки влияния скорости движения АНПА на параметры его автономности**Костенко В.В.¹ kosten.ko@mail.ru, Михайлов Д.Н.¹ denmih@list.ru¹ Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук

Аннотация. Эффективность АНПА определяется максимальной дальностью его движения при выполнении маршрутного задания, которая зависит от энергоемкости источника питания, скорости хода, гидродинамического сопротивления аппарата, энергопотребления его движительной установки и полезной нагрузки. В основу методики положены результаты виртуальной продувки 3D модели подводного аппарата разработки ИПМТ ДВО РАН, на основании которых определены требования к тяге маршевых движителей для заданного диапазона скорости движения. В соответствии с кривыми действия используемого гребного винта фиксированного шага была рассчитана зависимость частоты его вращения и требуемой мощности на валу от скорости движения аппарата. По результатам проведенных нагрузочных испытаний электропривода маршевых движителей с использованием алгоритма интерполяции найдена потребляемая им мощность, обеспечивающая вращение гребного винта с требуемой частотой. С применением регрессионного анализа результатов расчета этой мощности определена аналитическая зависимость мощности потребления движительной установки подводного аппарата от скорости его движения относительно воды. Предложенная методика расчета позволяет определить зависимости параметров автономности аппарата (запас хода, время непрерывного хода, требуемая энергоемкость бортового источника) от его скорости движения с учетом вариации эффективности гребного винта и электропривода маршевых движителей. В результате анализа зависимости дальности хода от маршевой скорости выявлен ее экстремум, соответствующий скорости экономного хода, обеспечивающей максимальный запас хода.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, гидродинамическое сопротивление, маршевый движитель, гребной электропривод, полезная нагрузка, дальность хода, скорость экономного хода.

Для цитирования: Костенко В.В., Михайлов Д.Н. Метод оценки влияния скорости движения АНПА на параметры его автономности, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 177—187. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.018.

Original articleDOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.018>**Method for assessing the impact of AUV's speed on its autonomy parameters**Vladimir V. Kostenko¹ kosten.ko@mail.ru, Denis N. Mikhailov¹ denmih@list.ru¹M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems

Far East Branch Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The efficiency of autonomous unmanned underwater vehicles is determined by the maximum range of their movement when performing a route task, which depends on the energy capacity of the power source, the speed of travel, the hydrodynamic resistance of the vehicle, and the energy consumption of the propulsion system. The methodology is based on the results of virtual testing of the 3D model of the AUV developed by IMTP FEB RAS, on the basis of which the requirements for the thrust of the cruise thrusters for a given range of movement speeds were determined. In accordance with the action curves of the propeller (P) of a constant pitch, the dependence of its rotation frequency and the required power on the shaft on the speed of movement of the apparatus was calculated. In accordance with the results of load tests of the electric drive of the cruise thrusters, using the interpolation algorithm, the consumed power was found, ensuring the rotation of the main propulsion unit with the required frequency. Using the regression analysis of the results of calculating this power, an analytical dependence of the power consumption of the propulsion unit of the apparatus on the speed of its movement relative to the water was determined. The proposed calculation method allows us to determine the dependence of the autonomy parameters of the apparatus (power reserve, continuous running time, required energy capacity of the onboard source) on its speed of movement, taking into account the variation in the efficiency of the main engine and the main engine. As a result of the analysis of the dependence of the cruising range on the cruising speed, its extremum was identified, corresponding to the speed of movement, providing the maximum power reserve.

Keywords: autonomous unmanned underwater vehicle, hydrodynamic resistance, cruise propulsion, electric propulsion, cruising range, fuel-efficient cruising speed.

For citation: Vladimir V. Kostenko, Denis N. Mikhailov Method for assessing the impact of AUV's speed on its autonomy parameters, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 177—187. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.018.

Введение

Современные исследования в области океанологии, изучения ледовой обстановки Арктического региона, наблюдения за экологической обстановкой окружающей среды, климатический мониторинг, проведение поисковых, гидрографических работ, мониторинг протяженных придонных конструкций, океанографические измерения, поиск затонувших объектов, химические и физические измерения водной среды, исследование объектов и рельефа дна и многие другие исследования невозможно представить без использования автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) [1-9]. Большие перспективы имеет также использование АНПА при решении задач мониторинга объектов подводных добычных комплексов [10,11], портовых акваторий [12], подводной транспортировки грузов [13] и в противоминных действиях [14,15].

Одной из основных технических характеристик АНПА является дальность хода, которая напрямую влияет на эффективность выполнения маршрутного задания [16-19]. При этом достижимая дальность хода аппарата определяется соотношением между потребляемой его движительно-рулевым комплексом (ДРК) электрической мощностью и энергоемкостью бортовой аккумуляторной батареи (АБ).

Традиционно параметры автономности АНПА рассчитываются с допущениями о постоянстве коэффициентов полезного действия (КПД) как гребного винта (ГВ), так и его электропривода (ЭП) [16,18,20,21]. На практике скорость движения АНПА относительно воды оказывает значительное влияние на относительную поступь ГВ, его момент сопротивления и КПД [22-25]. При этом эффективность гребного электропривода также зависит от частоты вращения ГВ и момента его сопротивления [26-31].

Целью работы является разработка методики оценки влияния скорости хода на время автономной работы и дальность хода АНПА «ММТ-2024» разработки ИПМТ ДВО РАН. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи: рассчитать гидродинамическое сопротивление аппарата через виртуальную продувку его 3D модели в заданном диапазоне скоростей движения, оценить влияние скорости набегающего потока на характеристики ГВ и электропривода МД, определить зависимости времени автономной работы и дальности хода от скорости движения АНПА.

1. Гидродинамическое сопротивление АНПА

В режиме установившегося движения АНПА перемещается относительно воды с постоянной скоростью хода, которая определяется тягой маршевых движителей и гидродинамическим сопротивлением корпуса аппарата. В свою очередь суммарная тяга маршевых движителей также зависит от компоновочной схемы ДРК аппарата. Достаточно эффективным и доступным методом анализа гидродинамики АНПА является метод "виртуальной продувки" его трехмерной 3D-модели [32-34]. Для оценки гидродинамического сопротивления АНПА «ММТ-2024» было

использовано приложение Cosmos Flow Works САПР Solid Works.

Конструктивные характеристики исследуемого аппарата поясняют рисунок 1 и таблица 1, а результаты виртуальной продувки его 3D модели в диапазоне скоростей 0-3 м/с показаны на рисунке 2.

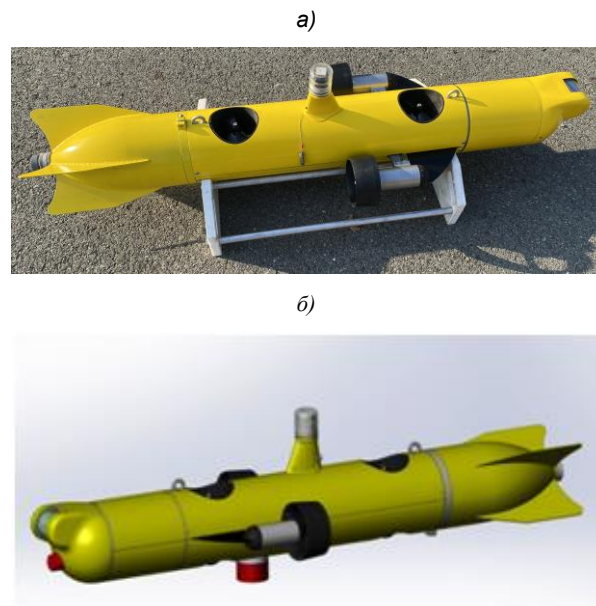


Рис. 1—АНПА «ММТ-2024»: а) конструктивный облик б) 3D модель

Таблица 1
Технические характеристики АНПА «ММТ-2024»

Характеристика	Значение
Максимальная глубина погружения, м	300
Длина/ширина/высота, м	3,6х1,7х0,4
Водоизмещение, м ³	0,24
Сухой вес, кг	238
Количество маршевых движителей	2
Количество вертикальных подруливающих движителей	2
Максимальная скорость хода, м/с	3,0
Энергоемкость АБ, Вт*час	4640
Максимальная дальность хода, км	200

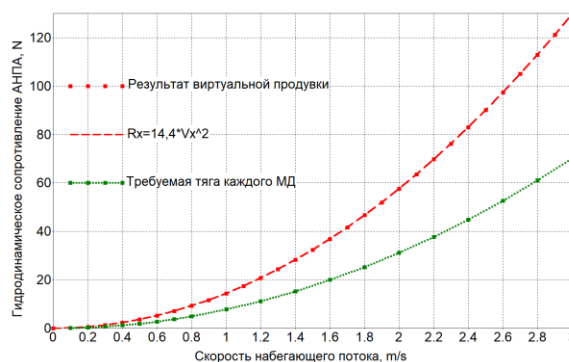


Рис. 2 – Результаты виртуальной продувки АНПА «ММТ-2024» в диапазоне скоростей хода 0,2-3,0 м/с

Анализ результатов проведенного расчета гидродинамического сопротивления аппарата выявил следующую аналитическую зависимость требуемой тяги каждого из двух маршевых движителей от скорости движения АНПА:

$$F_{\text{мд}} = 0,5R_x = 0,5K_{\text{гс}} V_x^2, \quad (1)$$

где: $F_{\text{мд}}$ – тяга каждого из двух маршевых движителей, [Н]; R_x – гидродинамическое сопротивление корпуса аппарата, [Н]; $K_{\text{гс}}=14,4$ – коэффициент гидродинамического сопротивления, [кг/м].

2. Оценка влияния скорости хода на параметры работы гребного винта МД

В составе АНПА «ММТ-2024» использован МД разработки ИПМТ ДВО РАН, технические характеристики которого приведены в таблице 2, а его конструктивный облик поясняет рисунок 3.

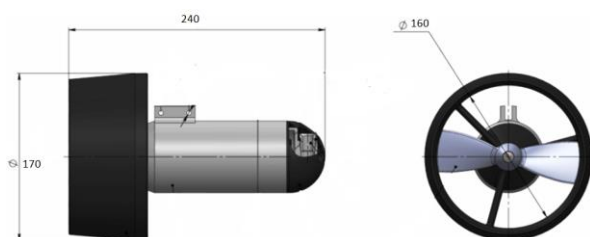


Рис. 3 – Маршевый движитель АНПА «ММТ-2024»

Таблица 2

Основные технические характеристики маршевого движителя

Характеристика	Значение
Тип электродвигателя	AT-Drive70
Габаритные размеры DxL, мм	170x240
Диаметр гребного винта, мм	160
Максимальная швартовная тяга, Н	112
Частота вращения гребного винта при максимальной швартовной тяге, об/с	24,6

Расчет частоты вращения ГВ, обеспечивающей требуемую тягу МД и момент его нагрузки для электропривода, производился по коэффициентам упора K_t и момента K_m . Если принять допущение об отсутствии влияния корпуса аппарата на скорость набегающего потока в диске гребного винта маршевых движителей, то аналитическую зависимость этих коэффициентов от относительной поступи λ можно определить в соответствие методикой Дайдола-Джонса [35] для заданного диаметра ГВ, его шагового и дискового отношений и количества лопастей по следующему соотношению:

$$\begin{aligned} K_t &= K_{t0} + K_{t1} \cdot \lambda + K_{t2} \cdot \lambda^2, \\ K_m &= K_{m0} + K_{m1} \cdot \lambda + K_{m2} \cdot \lambda^2, \\ \lambda &= \frac{V_x}{n_s \cdot D}; \end{aligned} \quad (2)$$

где: n_s – частота вращения ГВ, [об/с]; $D=0,16$ м – диаметр ГВ, [м]; $K_{t0}=0,2821$; $K_{t1}=-0,2704$; $K_{t2}=-0,1108$; $K_{m0}=0,03092$; $K_{m1}=-0,02488$; $K_{m2}=-0,01214$ – полиномиальные коэффициенты аналитического представления кривых действия $K_t(\lambda)$, $K_m(\lambda)$,

определенных по регрессионной базе испытания серийных ГВ программой PROPS [18].

Тягу ГВ в ньютонах $F_{\text{мд}}$ можно определить по следующему соотношению [16-18]:

$$F_{\text{мд}} = K_t(\lambda) \rho n_s^2 D^4 g, \quad (3)$$

где: $\rho=102$ – массовая плотность воды, [кг·с²/м⁴]; $g=9,81$ – ускорение свободного падения, [м/с²]. С учетом выражения (2) формулу (3) можно преобразовать к виду:

$$F_{\text{мд}} = \left[K_{t0} + K_{t1} \left(\frac{V_x}{n_s D} \right) \lambda + K_{t2} \left(\frac{V_x}{n_s D} \right)^2 \right] \rho n_s^2 D^4 g. \quad (4)$$

Разрешив уравнение (4) относительно n_s , получим:

$$\begin{aligned} A n_s^2 + B n_s + C &= 0, \\ A &= K_{t0} D^4 \rho g, \\ B &= K_{t1} V_x D^3 \rho g, \\ C &= K_{t2} V_x^2 D^2 \rho g - F_{\text{мд}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Далее, в соответствие с требуемой для достижения аппаратом заданной скорости хода тягой МД $F_{\text{мд}}$ по соотношению (6) находим частоту вращения n_s , момент сопротивления, буксировочную мощность, требуемую мощность на валу ГВ и его КПД:

$$\begin{aligned} n_s &= \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \\ M_{\text{гв}} &= [K_{m0} + K_{m1} \lambda + K_{m2} \lambda^2] \rho n_s^2 D^5 g, \\ N_{\text{в}} &= 2\pi n_s M_{\text{гв}}, \\ N_{\text{б}} &= F_{\text{мд}} V_x, \\ \eta_{\text{гв}} &= \frac{N_{\text{б}}}{N_{\text{в}}}; \end{aligned} \quad (6)$$

где: $M_{\text{гв}}$ – момент сопротивления ГВ, [Нм]; $N_{\text{в}}$ – требуемая для вращения ГВ механическая мощность привода, [Вт]; $N_{\text{б}}$ – буксировочная мощность ГВ, [Вт]; $\eta_{\text{гв}}$ – КПД ГВ.

Результаты проведенного расчета влияния скорости хода АНПА из диапазона 0,2÷3 м/с на параметры работы ГВ иллюстрируют таблица 3 и графики рисунка 4.

Таблица 3

Влияние скорости хода на характеристики гребного винта МД

V_x , м/с	$F_{\text{мд}}$, Н	n_s , об/с	$M_{\text{гв}}$, Нм	$N_{\text{в}}$, Вт	$N_{\text{б}}$, Вт	$\eta_{\text{гв}}$
0,2	0,30	2,21	0,007	0,09	0,06	0,651
0,3	0,70	3,34	0,015	0,32	0,21	0,649
0,4	1,30	4,50	0,028	0,80	0,52	0,647
0,5	2,00	5,61	0,044	1,54	1,00	0,648
0,6	2,80	6,68	0,062	2,59	1,68	0,649

0,7	3,80	7,79	0,084	4,10	2,66	0,649
0,8	5,00	8,92	0,110	6,16	4,00	0,649
1,0	7,80	11,15	0,172	12,02	7,80	0,649
1,2	11,20	13,37	0,246	20,71	13,44	0,649
1,4	15,30	15,61	0,337	33,01	21,42	0,649
1,6	19,90	17,82	0,438	49,05	31,84	0,649
1,8	25,30	20,07	0,556	70,18	45,54	0,649
2,0	31,20	22,30	0,686	96,16	62,40	0,649
2,2	37,80	24,53	0,831	128,16	83,16	0,649
2,4	44,90	26,75	0,987	165,93	107,76	0,649
2,6	52,70	28,98	1,159	211,14	137,02	0,649
2,8	61,20	31,22	1,346	264,08	171,36	0,649
3,0	67,80	33,18	1,500	312,66	203,40	0,651

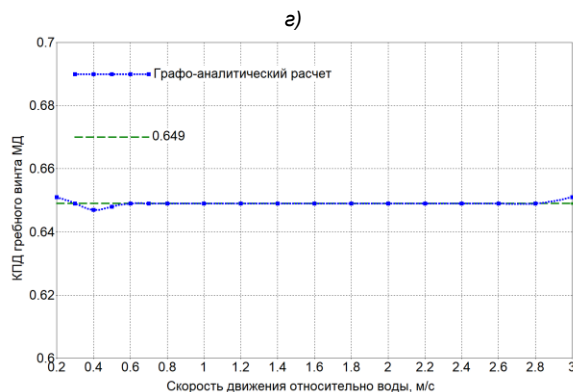
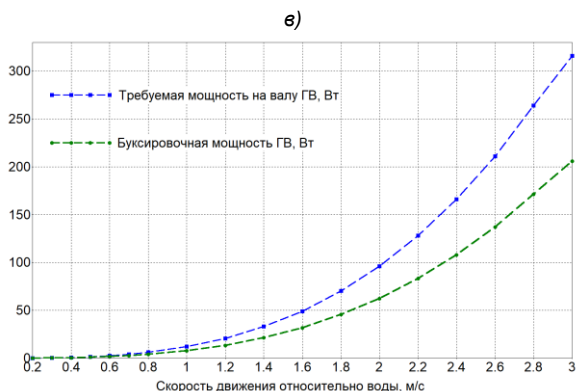
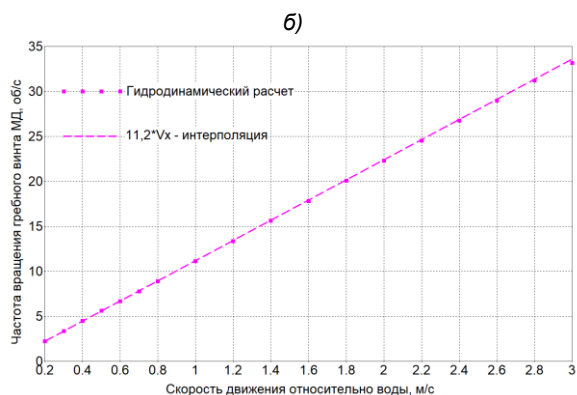
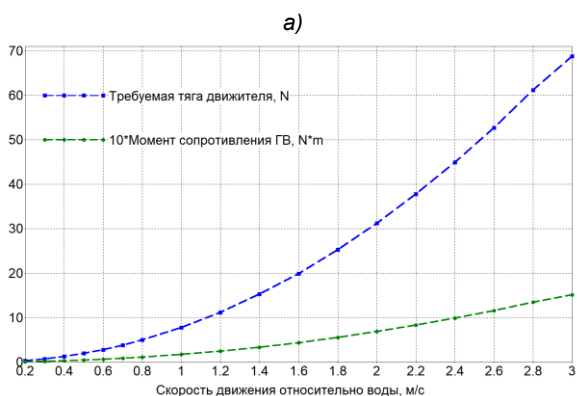


Рис. 4–Зависимость характеристик гребного винта МД от скорости хода АНПА «ММТ-2024»:

а) тяга и момент сопротивления, б) требуемая частота вращения [об/с], в) требуемая мощность привода и буксировочная мощность, г) КПД

3. Оценка влияния скорости хода на параметры гребного электропривода

Оценка влияния скорости хода АНПА на работу электропривода МД требует определения потребляемой им электрической мощности, соответствующей частоте вращения и требуемой мощности на валу ГВ из таблицы 3. Для получения необходимых данных об эксплуатационных характеристиках гребного электропривода были проведены его стендовые испытания на нагрузочном стенде ИПМТ ДВО РАН [29], в результате которых получено семейство механических характеристик.

Основу нагрузочного стенда ИПМТ составляет гистерезисный динамометр Magtrol HD-705-8NA-014, контроллер динамометра Magtrol DSP6001 и анализатор мощности Magtrol 6530. В процессе испытаний привод сначала разгоняется до скорости холостого хода, соответствующей назначенному коду управления. Далее программное обеспечение стенда создает изменение момента нагрузки от гистерезисного тормоза в заданном диапазоне и регистрирует частоту вращения, момент нагрузки, а также электрические параметры работы блока управления двигателем. Оборудование стенда показано на рисунке 5, а полученные результаты нагрузочных испытаний иллюстрируют графики рисунка 6.

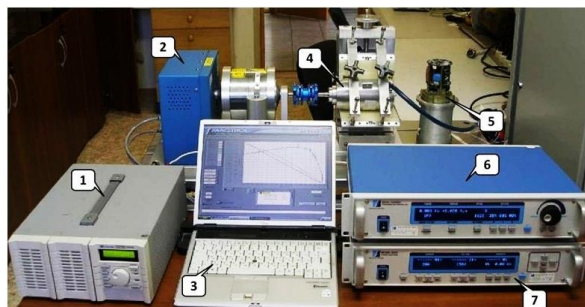


Рис. 5 – Оборудование нагрузочного стенда ИПМТ: 1 – блок питания, 2 – гистерезисный динамометр Magtrol HD-705-8NA-014, 3 – ПК, 4 – испытуемый двигатель, 5 – блок управления двигателем, 6 – контроллер динамометра Magtrol DSP6001, 7 – анализатор мощности Magtrol 6530

В исследуемых маршевых двигателях использован управляемый по моменту электропривод на базе бесколлекторного электродвигателя AT-Drive 70 от НПО «Андроидные технологии». При таком методе управления установившаяся частота вращения МД определяется балансом между моментом сопротивления ГВ и электродвижущим моментом привода, величина которого регулируется внешним цифровым кодом от системы бортового управления аппарата в диапазоне $-127 \leq N_c \leq 127$.

В ходе нагрузочных испытаний были получены зависимости потребляемой мощности гребного электропривода $N_{эл}$ и мощности на его валу $N_в$ (см. рисунок 6-а), КПД (см. рисунок 6-б) и электродвижущего момента (см. рисунок 7) от частоты вращения вала для цифровых кодов управления из диапазона $20 \div 127$, взятых с шагом 10.

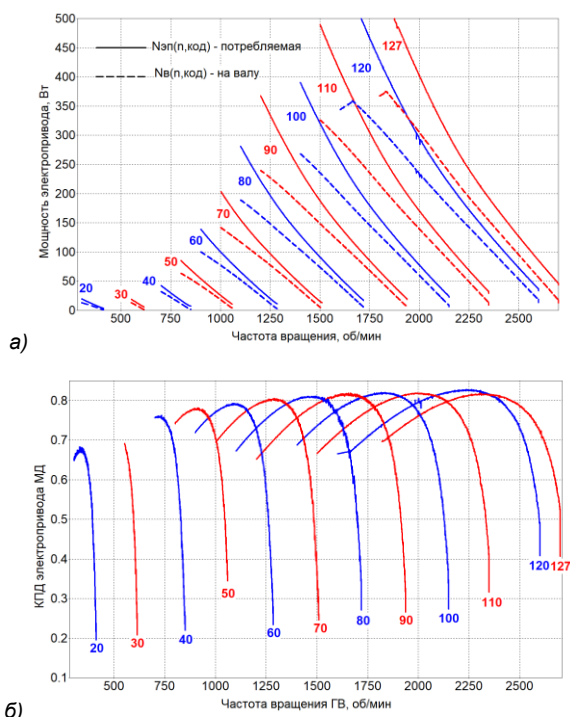


Рис. 6 – Зависимости параметров электропривода от частоты вращения:
а) полезная и потребляемая мощность, б) КПД

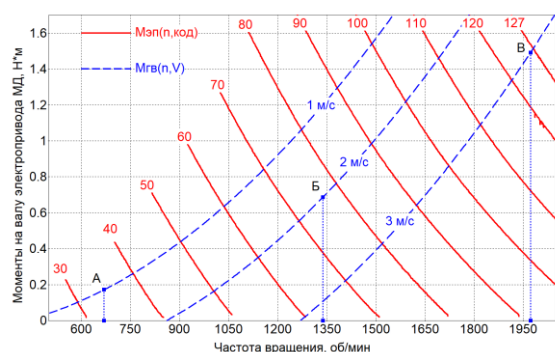


Рис. 7 – Экспериментальные механические характеристики электропривода МД и расчетные значения момента сопротивления ГВ для скоростей движения аппарата 1,2 и 3 м/с

Частота вращения ГВ n^* , обеспечивающая необходимую тягу МД для движения аппарата с требуемой скоростью (см. таблицу 3), соответствует моменту сопротивления ГВ $M_{гв}^*$ по выражению (6). При этом очень мала вероятность попадания точки $M_{гв}^*(n^*)$ на одну из экспериментальных механических характеристик гребного электропривода, что иллюстрируют точки А, Б и В рисунка 7, соответствующие скоростям хода 1, 2 и 3 м/с.

Поиск потребляемой электроприводом мощности на определенных в таблице 3 частотах вращения ГВ проводился с использованием интерполяции результатов нагрузочных испытаний в следующей последовательности.

На первом этапе в соответствии с зависимостью момента сопротивления ГВ от частоты вращения, определенной по соотношению (6), и семейством экспериментальных механических характеристик электропривода определялись частоты вращения n_1 и n_2 , соответствующие пересечению графика $M_{гв}(n)$ со смежными механическими характеристиками $M_{эл}(n)$, показанными на рисунке 8-а.

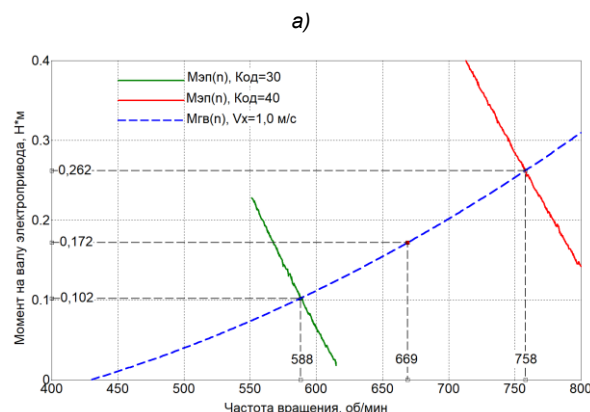
На втором этапе поиска для соответствующей пары зависимостей $N_{эл}(n)$ из семейства результатов нагрузочных испытаний определяем мощности потребления привода $N_{эл1}(n_1)$ и $N_{эл2}(n_2)$ (см. рисунок 8-б).

Для частоты вращения ГВ n^* , обеспечивающей движение аппарата на заданной скорости, потребляемая мощность $N_{эл}^*$ определяется с помощью интерполяции по двум соседним точкам $N_{эл1}(n_1)$ и $N_{эл2}(n_2)$. Коэффициент интерполяции находим по выражению:

$$K_{int} = \frac{N_{эл2} - N_{эл1}}{n_2 - n_1}. \quad (7)$$

При этом интерполированное решение $N_{эл}^*$, соответствующее частоте вращения ГВ n^* из таблицы 3 на выбранной скорости движения, может быть определено следующим образом:

$$N_{эл}^* = N_{эл1} + K_{int}(n^* - n_1). \quad (8)$$



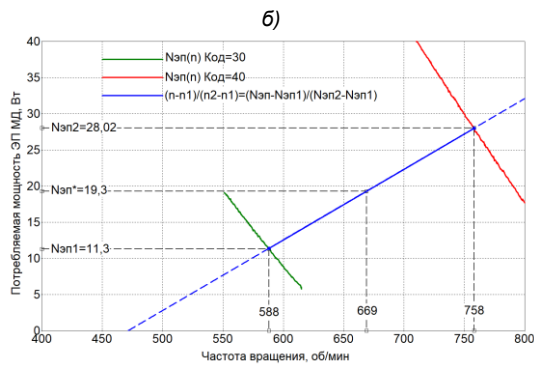


Рис. 8 – Определение мощности потребления электропривода по результатам его нагрузочных испытаний для скорости хода 1 м/с

а) определение смежных частот вращения ГВ
б) интерполяция $N_{эл}(V_x)$

В соответствии с предложенной методикой интерполяции была рассчитана мощность, потребления электропривода каждого МД и его КПД для скоростей движения аппарата относительно воды из диапазона 0,4÷3,0 м/с. Результаты этого расчета сведены в таблицу 4 и иллюстрируются графиками рисунка 9. При этом аналитическая форма зависимостей $N_{эл}(V_x)$ и $\eta_{эл}(V_x)$, определенная средствами регрессионного анализа [36] данных из таблицы 4, имеет следующий вид:

$$N_{эл}(V_x) = K_{N3}V_x^3 + K_{N2}V_x^2 + K_{N1}V_x + K_{N0}, \quad (9)$$

$$\eta_{эл}(V_x) = K_{\eta3}V_x^3 + K_{\eta2}V_x^2 + K_{\eta1}V_x + K_{\eta0};$$

где: $K_{N3}=20 \text{ Вт}\cdot\text{с}^3/\text{м}^3$; $K_{N2}=-17,8 \text{ Вт}\cdot\text{с}^2/\text{м}^2$; $K_{N1}=15,6 \text{ Вт}\cdot\text{с}/\text{м}$; $K_{N0}=1,2 \text{ Вт}$; $K_{\eta3}=0,123 \text{ с}^3/\text{м}^3$; $K_{\eta2}=-0,823 \text{ с}^2/\text{м}^2$; $K_{\eta1}=1,797 \text{ с}/\text{м}$; $K_{\eta0}=0,473$ – коэффициенты интерполирующих полиномов, определенные в ходе регрессионного анализа результатов расчета из таблицы 4.

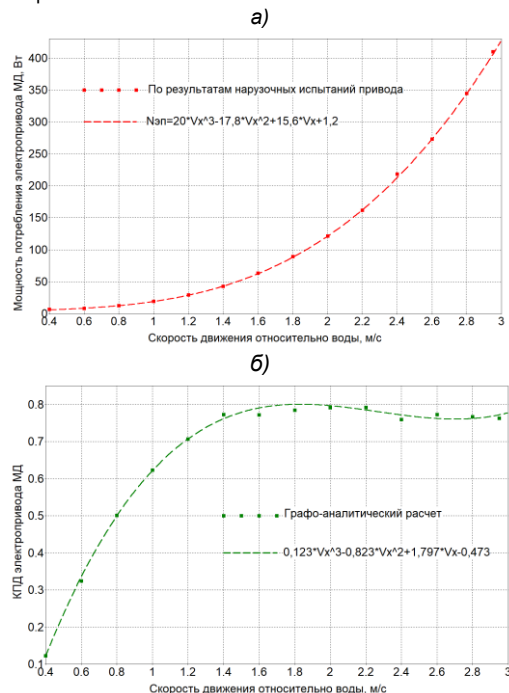


Рис. 9 – Зависимость характеристик электропривода МД от скорости движения АНПА
а) потребляемая мощность б) КПД

Таблица 4

Влияние скорости хода АНПА на характеристики электропривода МД

V_x , м/с	n , об/мин	n_s , об/с	N_e , Вт	$N_{эл}$, Вт	$\eta_{эл}$
0,4	270	4,50	0,80	6,5	0,123
0,6	401	6,68	2,59	8,0	0,324
0,8	535	8,92	6,16	12,3	0,501
1,0	669	11,15	12,02	19,3	0,623
1,2	802	13,37	20,71	29,3	0,707
1,4	937	15,61	33,01	42,7	0,773
1,6	1069	17,82	49,05	63,5	0,772
1,8	1204	20,07	70,18	89,4	0,785
2,0	1338	22,30	96,16	121,5	0,791
2,2	1472	24,53	128,16	161,8	0,792
2,4	1605	26,75	165,93	218,2	0,760
2,6	1739	28,98	211,14	273,3	0,773
2,8	1873	31,22	264,08	344,8	0,767
3,0	1991	33,18	312,66	410,0	0,763

4. Оценка влияния скорости хода на эксплуатационные параметры АНПА

Главными эксплуатационными параметрами АНПА являются время его автономной работы T_a и дальность хода D_a при заранее обусловленных значениях энергоемкости аккумуляторной батареи $E_{аб}$, скорости движения V_x и потребляемой системой аппарата мощностью $N_{анпа}$. Очевидна справедливость соотношений [16-18]:

$$D_a = V_x T_a, \quad (10)$$

$$T_a = E_{аб} / N_{анпа};$$

где: $N_{анпа}=N_{рза}+N_{эдрк}$ – суммарная электрическая мощность потребления АНПА, $N_{рза}$ – электрическая мощность, постоянно потребляемая оборудованием аппарата без учета движительно-рулевого комплекса, $N_{эдрк}=2N_{эл}$ – электрическая мощность потребления электроприводов двух маршевых движителей ДРК.

В свою очередь, мощность потребления оборудования обзорно-поискового АНПА без учета ДРК можно представить суммой следующих слагаемых:

$$N_{рза} = N_{су} + N_{пн}, \quad (11)$$

где: $N_{су}=32,4 \text{ Вт}$ – мощность потребления электронного оборудования системы управления АНПА (система бортового управления, навигационные датчики, контрольная аварийная система, оборудование локальной вычислительной сети), $N_{пн}$ – мощность потребления поисковых систем аппарата и его полезной нагрузки (гидролокаторы, фотосистема, многолучевой эхолот и т.д.).

Очевидный интерес представляет влияние работы полезной нагрузки АНПА на зависимость параметров его автономности от скорости хода. В качестве варианта комплекса поискового оборудования АНПА «ММТ-2024» используется аналог глубоководного гидролокатора бокового обзора (ГБО) и впередсмотрящего локатора

производства ООО «Экран» (Россия) со средним потреблением в режиме линейной частотной модуляции $N_{гбо}=12$ Вт [37] и многолучевой эхолот (МЛЭ) R2 Sonic 2020 от фирмы R2 Sonic LLT (США) со средним потреблением мощности $N_{млэ}=20$ Вт [38].

Для анализа были выбраны два варианта потребления бортовой электроники аппарата:

$$\begin{aligned} N_{рза1} &= N_{cy}, \\ N_{рза2} &= N_{cy} + N_{гбо} + N_{млэ}; \end{aligned} \quad (12)$$

где: $N_{рза1}=N_{cy}=32,4$ Вт – мощность потребления только электронных блоков системы управления АНПА, $N_{рза2}=32,4+12+20=64,4$ Вт – мощность, потребляемая с учетом включенной полезной нагрузки из ГБО и МЛЭ.

Рисунок 10 иллюстрирует выявленные на основании данных таблицы 4 зависимости

$$N_{анпа1}(V_x) = N_{эдрк} + N_{рза1} \quad \text{и}$$

$$N_{анпа2}(V_x) = N_{эдрк} + N_{рза2}$$

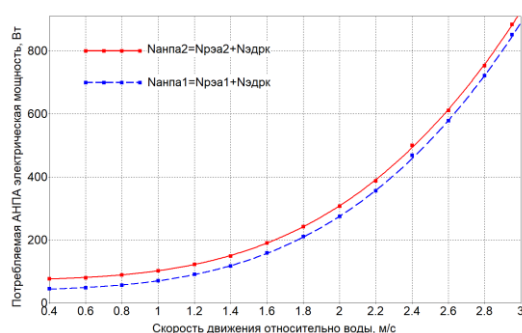


Рис. 10 – Зависимость потребляемой АНПА мощности от скорости хода

В результате регрессионного анализа полученных графиков средствами программы AdvancedGrapher [36] была определена аналитическая форма зависимостей $N_{анпа1}(V_x)$ и $N_{анпа2}(V_x)$:

$$\begin{aligned} N_{анпа1}(V_x) &= K_{13}V_x^3 + K_{12}V_x^2 + K_{11}V_x + K_{10}, \\ N_{анпа2}(V_x) &= K_{23}V_x^3 + K_{22}V_x^2 + K_{21}V_x + K_{20}; \end{aligned} \quad (13)$$

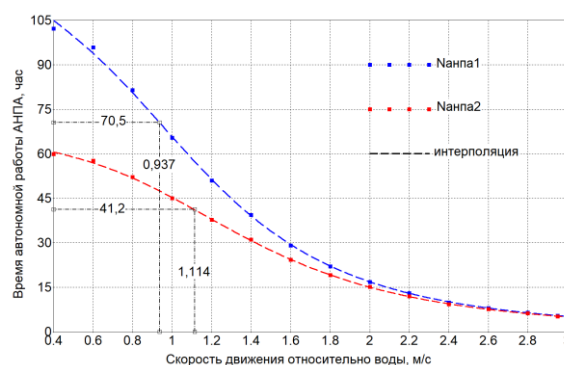
где: $K_{13}=40$ Вт·с³/м³; $K_{12}=-35,5$ Вт·с²/м²; $K_{11}=31,1$ Вт·с/м; $K_{10}=34,8$ Вт; $K_{23}=39,89$ Вт·с³/м³; $K_{22}=-33,88$ Вт·с²/м²; $K_{21}=28,54$ Вт·с/м; $K_{20}=68$ Вт – коэффициенты интерполирующих полиномов, определенные в ходе регрессионного анализа графиков рисунка 10.

Результаты расчета параметров автономности аппарата по соотношениям (10), проведенные для двух вариантов потребления бортовой электроники, и энергоемкости бортовой аккумуляторной батареи $E_{аб}=4640$ Вт·час сведены в таблицу 5 и иллюстрируются графиками рисунка 11. Анализ рисунка 11-б показывает наличие выраженного экстремума зависимости $D_a(V_x)$. Средствами программы Advanced Grapher [36] по производной этой зависимости были найдены значения скорости экономического движения, обеспечивающие максимальную дальность хода аппарата. Следует отметить тенденцию к увеличению этой скорости с увеличением мощности потребления бортовой электроники аппарата $N_{рза}$.

Таблица 5
Влияние скорости хода на автономность АНПА
($E_{аб}=4640$ Вт·час)

V_x , м/с	$N_{анпа1}$, Вт	$N_{анпа2}$, Вт	T_a , час		D_a , км	
			$N_{анпа1}$	$N_{анпа2}$	$N_{анпа1}$	$N_{анпа2}$
0,4	45,4	77,4	102,2	59,9	147,2	86,3
0,6	48,4	80,4	95,9	57,7	207,1	124,7
0,8	57,0	89,0	81,4	52,1	234,4	150,1
1,0	71,0	103,0	65,4	45,0	235,3	162,2
1,2	91,0	123,0	51,0	37,7	220,3	163,0
1,4	117,8	149,8	39,4	31,0	198,5	156,1
1,6	159,4	191,4	29,1	24,2	167,7	139,6
1,8	211,2	243,2	22,0	19,1	142,4	123,6
2,0	275,4	307,4	16,8	15,1	121,3	108,7
2,2	356,0	388,0	13,0	12,0	103,2	94,7
2,4	468,8	500,8	9,9	9,3	85,5	80,1
2,6	579,0	611,0	8,0	7,6	75,0	71,1
2,8	722,0	754,0	6,4	6,2	64,8	62,0
3,0	852,4	884,4	5,4	5,2	57,8	55,7

а)



б)

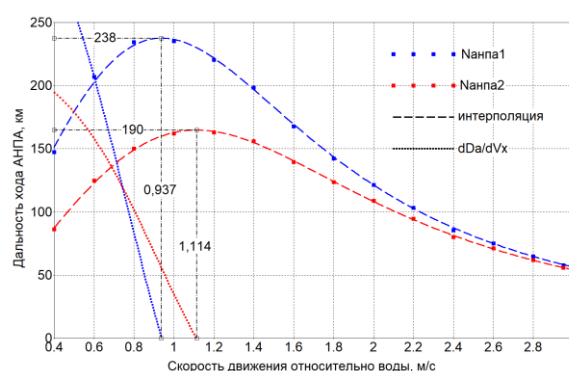


Рис.11 – Зависимость параметров автономности АНПА от скорости движения относительно воды:
а) время автономной работы б) дальность хода

Заключение

Анализ результатов проведенного исследования факторов, влияющих на параметры автономности АНПА позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Разработана методика оценки зависимости дальности хода и времени автономности от скорости набегающего потока для АНПА, учитывающая изменение эффективности маршевых движителей и мощности потребления полезной нагрузки.

2. Определена зависимость характеристик ГВ МД от скорости движения аппарата, расчет которых основан на результатах виртуальной продувки 3D модели АНПА и гидродинамического расчета ГВ.

3. По результатам проведенных нагрузочных испытаний с применением их интерполяции определена зависимость мощности потребления и КПД гребного электропривода МД от скорости хода аппарата.

4. Предложено аналитическое представление зависимости времени автономности и дальности хода АНПА «ММТ-2024» от скорости движения относительно воды для исходных данных от энергоемкости аккумуляторной батареи и двух вариантов энергопотребления бортовой электроники.

5. Выявлено наличие экстремума зависимости $D_a(V_x)$, определены значения максимально достижимой дальности движения АНПА «ММТ-2024» и соответствующие значения скоростей экономного

хода для двух вариантов энергопотребления бортовой электроники.

6. Определена тенденция к увеличению скорости экономного хода при увеличении мощности потребления бортовой электроники аппарата N_{pza} .

7. Разработанная методика может быть использована для планирования маршрутного задания АНПА по заданной дальности движения с учетом изменения мощности потребления полезной нагрузки аппарата.

Дальнейшие исследования будут посвящены проверке разработанной методики через сравнение рассчитанных параметров автономности с полученными в ходе натурных испытаний аппарата по специальной программе.

Работа выполнена по теме государственного задания ИПМТ ДВО РАН «Разработка автономных и гибридных подводных робототехнических комплексов, их систем управления, навигации и связи для расширения функциональных возможностей средств освоения Мирового океана» (№ государственной регистрации 1022061700020-5-2.2.2).

Литература

1. JiaF. et al. Research status and development trend of scientific research autonomous underwater vehicles in polar regions // Ocean Engineering. – 2025. – Т. 332. – С. 121418.
2. Горлов А. А. Долговременные океанологические исследования с помощью автономных подводных необитаемых аппаратов // Научное обозрение. Технические науки. – 2020. – №. 4. – С. 81-94.
3. Гизитдинов М. Р., Кузьмицкий М. А. Мобильные подводные роботы в современной океанографии и гидрофизике // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2022. – №. 1. – С. 4-13.
4. Зубченко Э. С., Шарков А. М. Концепция разработки и оснащения автономных необитаемых подводных аппаратов для решения задач навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения ВМФ // Навигация и гидрография. – 2021. – №. 62. – С. 18-32.
5. Голядкина С. С., Кудрявцев И. А., Харченко Ю. А. АНПА для арктического шельфа // Деловой журнал Neftgaz. RU. – 2021. – №. 2. – С. 94-97.
6. Алексанин А. И., Щербатюк А. Ф. О мониторинге морских рыбопромысловых районов с использованием спутниковых данных и информации от морских робототехнических комплексов // Управление большими системами: сборник трудов. – 2022. – №. 100. – С. 236-260.
7. Боженов Ю. А. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2022. – Т. 4. – №. 1. – С. 47-68.
8. Володин А. Н., Панасенко В. В., Хорошев В. А. Анализ и перспективы развития автономных необитаемых подводных аппаратов // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника-2022. – 2022. – С. 198-204.
9. Бабаев Р. А. и др. Технология использования АНПА для исследования глубоководных экосистем Атлантического сектора Антарктики // Подводные исследования и робототехника. – 2020. – №. 2. – С. 13-21. DOI: 10.37102/24094609.2020.32.2.002.
10. Матвиенко Ю. В., Костенко В. В., Щербатюк А. Ф., Ремезков А. В. Развитие технологического потенциала автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника/ 2020. №4 (34). С.4–14. DOI: 10.37102/24094609.2020.34.4.001.
11. Щербатюк А. Ф. Об использовании необитаемых подводных аппаратов при освоении месторождений глубоководных минералов // Подводные исследования и робототехника. 2023. №. 2 (44). С. 4–19. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_44_02_01. EDN: EOLJVM.
12. Щербатюк А. Ф. Перспективы использования автономной подводной робототехники для мониторинга портовых акваторий // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023): труды Шестнадцатой международной конференции. – 2023. – С. 1055-1060. DOI: 10.25728/mlsd.2023. С. 1055-1060.
13. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А., Андреюк Н. Р. Транспортировка грузов с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов // ТРАНСПОРТ РОССИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ. – 2023. – С. 220-228.
14. Вагин А. В., Воротынцева А. С. Автономный необитаемый подводный аппарат для поиска, обнаружения и уничтожения миноподобных объектов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 4. С. 5–15. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-4-5-15.
15. Кузьмицкий М. А., Гизитдинова М. Р. Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ: Современные технологии и перспективы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2022. – Т. 4. – №. 3. – С. 37-48.
16. Агеев М. Д., Касаткин Б. А., Киселев Л. В. и др. Автоматические подводные аппараты. Л.: Судостроение, 1981. 223 с.

17. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др Автономные подводные роботы: системы и технологии / под общ. ред. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 398 с.
18. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, Ю.В. Матвиенко, А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк; [отв.ред. Л.В. Киселев]; ФГБУН Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН. – Владивосток, 2018. – 368 с.
19. Griffiths G. (ed.). Technology and applications of autonomous underwater vehicles. – CRC Press, 2002. – Т. 2.
20. Allotta B, Costanzi R, Monni N, Mang H.A., Eberhardsteiner J., Bohm H.J., Rammerstorner F.G. Design and simulation of an autonomous underwater vehicle. In: *European congress on computational methods in applied sciences and engineering (ECCOMAS 2012)* (ed Eberhardsteiner J, et al.), 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS 2012; Vienna; Austria; 10 September 2012 through 14 September 2012.
21. Костенко В.В., Михайлов Д.Н. Определение параметров энергосиловой установки автономного необитаемого подводного аппарата по заданной дальности хода. // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013 г. – №3 (140) – С. 70-73.
22. Thor I. Fossen. Nonlinear Output Feedback Control of Underwater Vehicle Propellers Using Feedback Form Estimated Axial Flow Velocity / T.I. Fossen, M. Blanc. IEEE Journal of oceanic Engineering. Vol. 25, No. 2, 2000. P. 241-255.
23. Benedetto Allota. Preliminary design and fast prototyping of an Autonomous Underwater Vehicle propulsion system / B. Allotta, L. Pugi, F. Bartolini, A. Ridolfi, R. Costanzi, N. Monni, J. Gelli. Proc. IMechE. Part M: / Engineering for the Maritime Environment 201X, Vol XX(X), 2013. P. 1-25.
24. A.J. Healey. Toward an Improved Understanding of Thruster Dynamics for Underwater Vehicles / A.J. Healey, S.M. Rock, S. Cody, D. Miles, J.P. Brown. IEEE Journal of oceanic Engineering. Vol. 20, No. 4, 1995. P.354-361.
25. Alexander B Phillips. Comparison of CFD Simulations and In-service Data for the Self Propelled Performance of an Autonomous Underwater Vehicle / 27th Symposium on Naval Hydrodynamics Seoul, Korea, 5-10 October 2008.
26. Dana R. Yoerger. The Influence of Thruster Dynamics on Underwater Vehicle Behavior and Their Incorporation Into Control System Design / D. R. Yoerger, J. E. Slotine. IEEE Journal of Oceanic Engineering. Vol. 15, № 3. 1990. P.167-178.
27. Louis L. Whitcomb. Preliminary Experiments in Model-Based Thruster Control for Underwater Vehicle Position / L. L. Whitcomb, D. R. Yoerger. IEEE Journal of Oceanic Engineering. Vol. 20, № 20. 1999. P.1-14.
28. Костенко В.В., Михайлов Д.Н. Анализ влияния вариаций эффективности движительной установки на точность расчета дальности хода автономного необитаемого подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 1 (174). – С. 110-122.
29. Костенко В.В., Толстоногов А.Ю. Оценка характеристик маршевого движителя подводного аппарата по результатам нагрузочных испытаний электропривода // Подводные исследования и робототехника/ 2022. №2 (40). С.4–12. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_40_02_01. EDN: AWRENY.
30. Костенко В.В. Управление маршевыми движителями подводного аппарата, инвариантное к скорости хода // Подводные исследования и робототехника. 2023. №3 (45). С. 30-40. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_45_03_04. EDN: AQMKZC.
31. Костенко В.В., Найденов Н.А., Василенко Р.П. Разработка математической модели подруливающего движителя для режима динамического позиционирования АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2024. №4 (50). С. 55-66. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_50_04_06. EDN: OWKVNB.
32. Киселев Л.В., Медведев А.В. Сравнительный анализ и оптимизация динамических свойств автономных подводных роботов различных проектов и конфигураций // Подводные исследования и робототехника. 2012. №1(13). С.24-35.
33. Kiselev L. V., Bagnitckii A. V., Medvedev A. V. Identification of AUV Hydrodynamic Characteristics Using Model and Experimental Data // Gyroscopy and Navigation. 2017. Vol. 8, No. 3. P. 217–225.
34. Киселев Л.В., Костенко В.В., Медведев А.В. К оценке динамических характеристик АНПА "МТ-3500" на основе модельных и экспериментальных данных // Подводные исследования и робототехника/ 2022. №3 (41). С.33–42.
35. Daidola J.C, Johnson F.M (1992) Propeller Selection and Optimization Program. Manual for the Society of Naval Architects and Marine. NY.: Society of Naval Architects and Marine, 1992, 258 p.
36. Евстегнеева А. С. Использование компьютерной программы Advanced Grapher как средства реализации принципа наглядности в процессе обучения математике // Молодой ученый. - 2018. - № 2. - С. 108-112.
37. Ультракompактный глубоководный ГБО и вперёдсмотрящий локатор для ТНПА. Спецификация. – Текст электронный // ООО «Экран»: [сайт] – URL: <http://hydrasonars.ru/products/equipment-for-rov-auv/deep-water-sss-for-rov-auv> (дата обращения 06.02.2025).
38. MultibeamEchosounderR2 Sonic-V. Specification. – Текст: электронный // R2Sonic, LLT: [сайт] – URL: https://r2sonic.com/wp-content/uploads/2024/11/R2-R3-SONIC-V-Series_A4-11.19.24-1.pdf (дата обращения 06.02.2025).

References

1. JiaF. et al. Research status and development trend of scientific research autonomous underwater vehicles in polar regions //Ocean Engineering. – 2025. – Т. 332. – P. 121418.
2. Gorlov A. A. Long-Term Oceanological Research Using Autonomous Unmanned Underwater Vehicles //Scientific Review. TechnicalSciences. – 2020. – No. 4. – P. 81-94. [In Russian].
3. Gizitdinova M.R., Kuzmitsky M.A. Mobile Underwater Robots in Modern Oceanography and Hydrophysics. //Fundamental and Applied Hydrophysics. – 2022. – No. 1. – P. 4-13. [In Russian].

4. Zubchenko E.S., Sharkov A.M. Concept of Development and Equipping of Autonomous Unmanned Underwater Vehicles for Solving Problems of Navigational, Hydrographic and Hydrometeorological Support of the NAVY // Navigation and hydrography. – 2021. – No. 62. – P. 18-32. [In Russian].
5. Golyadkina S.S., Kudryavtseva A., Kharchenko Yu. A. AUV for the Arctic shelf // Business magazine Neftegaz. RU. – 2021. – No. 2. – P. 94-97. [In Russian].
6. Aleksanin A.I., Shcherbatyuk A.F. On Monitoring of Marine Fishing Areas Using Satellite Data and Information from Marine Robotic System // Management of Large Systems: A Collection of Works. – 2022. – No. 100. – pp. 236-260. [In Russian].
7. Bozhenov J.A. Use of the Autonomous Underwater Vehicles for the Arctic and Antarctic Regions Exploration. // Fundamental and Applied Hydrophysics. – 2011. – No. 4(1). – pp. 47-68. [In Russian].
8. Volodin A. N., Panasenkov V. V., Khoroshev V. A. Analysis and Development Prospects of Autonomous Unmanned Underwater Vehicles // Intelligent Systems, Control and Mechatronics-2022. – 2022. – pp. 198-204. [In Russian].
9. Babaev R. A. et al. Technology of Using AUVs for Studying Deep-Sea Ecosystems of the Atlantic Sector of Antarctica // Underwater investigations and robotics. – 2020. – No. 2(32). – P. 13-21. DOI: 10.37102/24094609.2020.32.2.002. [In Russian].
10. Matvienko Yu.V., Kostenko V.V., Shcherbatyuk A.F., Remezko A.V. Development of the Technological Potential of Autonomous Unmanned Underwater Vehicles // Underwater investigations and robotics. 2020. No. 4 (34). P. 4–14. DOI: 10.37102/24094609.2020.34.4.001. [In Russian].
11. Shcherbatyuk A.F. On the Use of Unmanned Underwater Vehicles in the Development of Deep-Sea Mineral Deposit // Underwater investigations and robotics. 2023. No. 2 (44). P. 4–19. DOI: 10.37102/1992- 4429_2023_44_02_01. EDN: EOLJVM. [In Russian].
12. Shcherbatyuk A. F. Prospects for the Use of Autonomous Underwater Robotics for Monitoring Port Waters // Management of Large-Scale Systems Development (MLSD'2023): Proceedings of the Sixteenth International Conference. – 2023. – P. 1055-1060. DOI: 10.25728/mlsd.2023. P. 1055-1060. [In Russian].
13. Kaminsky V. Yu., Skorokhodov D. A., Andreyuk N. R. Transportation of Goods Using Autonomous Unmanned Underwater Vehicles // TRANSPORT OF RUSSIA: PROBLEMS AND PROSPECTS–. – 2023. – P. 220-228. [In Russian].
14. Vagin A. V., Vorotyntseva A. S. Autonomous Unmanned Underwater Vehicle for Searching, Detecting and Destroying Mine-like Objects // Izvestiya. St. Petersburg State Technical University "LETI". 2023. Vol. 16, No. 4. P. 5-15. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-4-5-15. [In Russian].
15. Kuzmitsky M. A., Gizitdinova M. R. Mobile Underwater Robots in Solving Naval Problems: Modern Technologies and Prospects // Fundamental and applied hydrophysics. - 2022. - V. 4. - No. 3. - P. 37-48. [In Russian].
16. Unmanned Free Submersibles / Ageev M.D., Kasatkin B.A., Kiseliov L.V., et al. L: Sudostroenie, 1981. - 224 p. [In Russian].
17. Autonomous underwater robots: systems and technology / M.D. Ageev, L.V. Kiselev, Yu.V. Matvienko; Edited by M.D. Ageev; [Executive Ed. L.V. Kiselev]; Institute of Marine Technology Problems. - M.: Nauka, 2005. - 398 p. [In Russian].
18. Inzartsev, L. Kiselev, V. Kostenko, Yu. Matvienko, A. Pavin, A. Shcherbatyuk, Underwater robotic complexes: systems, technologies, application. Ed. by L. Kiselev. FSB Institute of Problems of Marine Technologies FEB RAS: Vladivostok, 2018, 368 p. [In Russian].
19. Griffiths G. (ed.). Technology and applications of autonomous underwater vehicles. – CRC Press, 2002. – T. 2.
20. Allotta B, Costanzi R, Monni N, Mang H.A., Eberhardsteiner J., Bohm H.J., Rammerstorner F.G. Design and simulation of an autonomous underwater vehicle. In: *European congress on computational methods in applied sciences and engineering (ECCOMAS 2012)* (ed Eberhardsteiner J, et al.), 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS 2012; Vienna; Austria; 10 September 2012 through 14 September 2012.
21. Kostenko V. V., Mikhailov D. N. Determination of parameters AUV's power plant on the set of long cruising range. Taganrog: IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES, 2013, No. 3 (140), pp. 70-73. [In Russian].
22. Thor I. Fossen. Nonlinear Output Feedback Control of Underwater Vehicle Propellers Using Feedback Form Estimated Axial Flow Velocity / T.I. Fossen, M. Blanc. IEEE Journal of oceanic Engineering. Vol. 25, No. 2, 2000. P. 241-255.
23. Benedetto Allotta. Preliminary design and fast prototyping of an Autonomous Underwater Vehicle propulsion system / B. Allotta, L. Pugi, F. Bartolini, A. Ridolfi, R. Costanzi, N. Monni, J. Gelli. Proc. IMechE. Part M: / Engineering for the Maritime Environment 201X, Vol XX(X), 2013. P. 1-25.
24. A.J. Healey. Toward an Improved Understanding of Thruster Dynamics for Underwater Vehicles / A.J. Healey, S.M. Rock, S. Cody, D. Miles, J.P. Brown. IEEE Journal of oceanic Engineering. Vol. 20, No. 4, 1995. P. 354-361.
25. Alexander B Phillips. Comparison of CFD Simulations and In-service Data for the Self-Propelled Performance of an Autonomous Underwater Vehicle / 27th Symposium on Naval Hydrodynamics Seoul, Korea, 5-10 October 2008.
26. Dana R. Yoerger. The Influence of Thruster Dynamics on Underwater Vehicle Behavior and Their Incorporation Into Control System Design / D. R. Yoerger, J. E. Slotine. IEEE Journal of Oceanic Engineering. Vol. 15, № 3. 1990. P. 167-178.
27. Louis L. Whitcomb. Preliminary Experiments in Model-Based Thruster Control for Underwater Vehicle Position / L. L. Whitcomb, D. R. Yoerger. IEEE Journal of Oceanic Engineering. Vol. 20, № 20. 1999. P. 1-14.
28. Kostenko V. V., Mikhailov D. N. Analysis of the influence of the propulsion installation on calculation's accuracy of the movement range autonomous underwater vehicle. Taganrog: IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES, 2016, No. 1 (174), pp. 110-122. [In Russian].

29. Kostenko V.V., Tolstonogov A.Yu. Evaluation of the Characteristics of the Cruise Propulsion Unit of an Underwater Vehicle Based on the Results of Load Tests of the Electric Drive // Underwater investigations and robotics / 2022. No. 2 (40). P. 4–12. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_40_02_01. EDN: AWRENY [In Russian].
30. Kostenko V.V. AUV Propulsion System Control Invariant to Travel Speed // Underwater investigations and robotics. 2023. No. 3 (45). P. 30–40. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_45_03_04. EDN: AQMKZC. [In Russian].
31. Kostenko V.V., Naidenko N.A., Vasilenko R.P. Development of a Mathematical Model of a Thruster for the Dynamical Position Mode of an Underwater Vehicles // Underwater investigations and robotics / 2024. No. 4 (50). P. 55–66. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_50_04_06. EDN: OWKVHB. [In Russian].
32. Kiselev L.V., Medvedev A.V. Comparative Analysis and Optimization of Dynamic Properties of Autonomous Underwater Robots of Various Designs and Configurations // Underwater investigations and robotics / 2012. No. 1 (13). P. 24–35. [In Russian].
33. Kiselev L. V., Bagnitskii A. V., Medvedev A. V. Identification of AUV Hydrodynamic Characteristics Using Model and Experimental Data // Gyroscopy and Navigation. 2017. Vol. 8, No. 3. P. 217–225.
34. Kiselev L.V., Kostenko V.V., Medvedev A.V. On the Assessment of the Dynamic Characteristics of the AUV "MT-3500" Based on Model and Experimental Data // Underwater investigations and robotics / 2022. No. 3 (41). P. 33–42. [In Russian].
35. Daidola J.C., Johnson F.M (1992) Propeller Selection and Optimization Program. Manual for the Society of Naval Architects and Marine. NY.: Society of Naval Architects and Marine, 1992, 258 p.
36. Evstegneeva A. S. Using the Advanced Grapher computer program as a means of implementing the principle of clarity in the process of teaching mathematics // Young scientist. – 2018. – №. 2. – pp. 108–112. [In Russian].
37. Ultra-compact deep-sea SSS and forward-looking locator for ROV. Specification. [Electronic resource]. URL: <http://hydrasonars.ru/products/equipment-for-rov-auv/deep-water-sss-for-rov-auv> (date of access: 06.02.2025). [In Russian].
38. Multibeam Echosounder R2 Sonic-V. Specification. [Electronic resource]. URL: https://r2sonic.com/wp-content/uploads/2024/11/R2-R3-SONIC-V-Series_A4-11.19.24-1.pdf (date of access: 06.02.2025).

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

Костенко Владимир Владимирович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией исполнительных устройств и систем телеуправления, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ИПМТ ДВО РАН), 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5А, e-mail: kostenko@marine.febras.ru, kosten.ko@mail.ru

Vladimir V. Kostenko, Dr. Sci. (Eng), Head of the Laboratory of Actuators and Telecontrol Systems, Academician M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems Far East Branch of RAS (IMTP FEB RAS), Sukhanova str., 5A, Vladivostok, 690091, Russian Federation, e-mail: kostenko@marine.febras.ru, kosten.ko@mail.ru

Михайлов Денис Николаевич, старший научный сотрудник лаборатории исполнительных устройств и систем телеуправления, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ИПМТ ДВО РАН), 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5А, e-mail: denmih@marine.febras.ru, denmih@mail.ru

Denis N. Mikhailov, senior researcher of the Laboratory of Actuators and Telecontrol Systems, Academician M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems Far East Branch of RAS (IMTP FEB RAS), Sukhanova str., 5A, Vladivostok, 690091, Russian Federation, e-mail: denmih@marine.febras.ru, denmih@mail.ru

Статья поступила в редакцию /the article was submitted 16.06.2025.

Одобрена после рецензирования / approved after reviewing 25.08.2025.

Принята к публикации /accepted for publication 12.02.2026

Научная статья

УДК 621.391.01

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.019>

Решение статистических задач по ограниченным наблюдениям с помощью принципа минимакса энтропии при обработке сигналов в корабельных радиотехнических системах

Артюшенко В.М.¹ artuschenko@mail.ru, Самаров Е.К.² omega511@mail.ru, Воловач В.И.³ volovach.vi@mail.ru¹Технологический университет им. А.А. Леонова, ²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ³Поволжский государственный университет сервиса

Аннотация. Как правило, характерной особенностью функционирования сложных корабельных радиотехнических систем, систем радионавигации, гидролокации и гидроакустики, средств автоматической радиолокационной прокладки, совмещенной с электронной картографической системой, является отсутствие исчерпывающих сведений о статистических свойствах случайного фона. Принятие оптимальных статистических решений в этих условиях сопряжено с проблемой априорной неопределенности. Рассмотрен и проанализирован вариационный подход к проблеме непараметрической априорной неопределенности, позволяющий оценить неизвестный закон распределения с максимальной точностью. На основе информационного критерия минимакса энтропии наблюдений получено выражение решающей статистики по первым двум моментам неизвестного распределения. Рассмотрен адаптивный вариант ее реализации, исследованы вопросы сходимости. Показано, что выборочная оценка минимакса энтропии сходится к оптимальному для плотности распределения вероятности решению со скоростью значительно лучшей результатов, полученных, например, в теории асимптотически оптимальных ядерных оценок. Получена верхняя граница ошибки оценивания в метрике, подтверждающая, что метод минимакса энтропии дает асимптотически точное решение проблемы встречных гипотез. Дана интерпретация полученных результатов на примере задачи обнаружения. Показано, что синтезированный обнаружитель по сравнению с классическим адаптивным, имеет устойчивый выигрыш в динамических характеристиках.

Ключевые слова: непараметрическая априорная неопределенность, вариационный подход, критерий минимакса энтропии наблюдений, оптимальные статистические решения, задача обнаружения сигнала.

Для цитирования: Артюшенко В.М., Самаров Е.К., Воловач В.И. Решение статистических задач по ограниченным наблюдениям с помощью принципа минимакса энтропии при обработке сигналов в корабельных радиотехнических системах. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 188—194. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.019.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.019>

Solving statistical problems based on limited observations using the principle of entropy minimax in signal processing in shipboard radio systems

Vladimir M. Artyushenko¹ artuschenko@mail.ru, Eugene K. Samarov² omega511@mail.ru,Vladimir I. Volovach³ volovach.vi@mail.ru¹Technological University named after A.A. Leonov, ²St. Petersburg State Marine Technical University,³Volga region State University of Service

Abstract. As a rule, a characteristic feature of the functioning of complex shipboard radio engineering systems, radio navigation, sonar and sonar systems, automatic radar laying tools combined with an electronic cartographic system, is the lack of comprehensive information about the statistical properties of a random background. Making optimal statistical decisions in these conditions is associated with the problem of a priori uncertainty. A variational approach to the problem of nonparametric a priori uncertainty is considered and analyzed, which makes it possible to estimate an unknown distribution law with maximum accuracy. Based on the information criterion of the minimax of the entropy of observations, the expression of the decisive statistics for the first two moments of the unknown distribution is obtained. An adaptive version of its implementation is considered, and convergence issues are investigated. It is shown that the sample estimate of the entropy minimax converges to the optimal solution for the probability distribution density at a rate significantly better than the results obtained, for example, in the theory of asymptotically optimal nuclear estimates. The upper bound of the estimation error in the metric is obtained, confirming that the entropy minimax method provides an asymptotically accurate solution to the problem of counter hypotheses. The interpretation of the obtained results is given using the example of the detection task. It is shown that the synthesized detector has a steady gain in dynamic characteristics compared to the classical adaptive detector.

Keywords: nonparametric a priori uncertainty, variational approach, criterion of minimax of the entropy of observations, optimal statistical solutions, the problem of signal detection.

For citation: Vladimir M. Artyushenko, Eugene K. Samarov, Vladimir I. Volovach. Solving statistical problems based on limited observations using the principle of entropy minimax in signal processing in shipboard radio systems. Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 188—194. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.019.

Введение

Современные корабельные радиотехнические системы невозможно себе представить без новейших высокотехнологичных систем радионавигации, гидролокации и гидроакустики, систем радиосвязи [1-3]. При решении конкретных радиотехнических задач, характерной особенностью функционирования этих сложных корабельных радиотехнических систем является отсутствие исчерпывающей информации о статистических свойствах случайного фона.

В этих условиях принятие оптимальных статистических решений сопряжено с проблемой априорной неопределенности. Одним из эффективных средств для ее решения может быть адаптивный байесовский подход [4], в рамках которого проблема априорной неопределенности переходит в проблему встречных гипотез о неизвестном законе распределения [5]. Классический подход к решению проблемы встречных гипотез в ее наиболее общем, непараметрическом варианте основывается на положениях асимптотической теории оценивания [6]. Существуют два класса непараметрических оценок распределений [7]: ядерного типа и проекционные, причем последние [8], характеризуются не ухудшаемой по порядку скоростью сходимости. Однако на практике часто возникают ситуации, когда асимптотически оптимальные свойства неизвестных оценок не могут быть реализованы в полной мере. Это справедливо, например, в задачах с ограниченным объемом наблюдений [9], особенно при многомерных выборках, когда неопределенность наблюдений возрастает [8, 10].

Целью данной работы является решение, актуальной для всех указанных ситуаций, задачи некорректного анализа, когда на основе ограниченных данных требуется оценить неизвестный закон распределения с максимальной точностью. При этом самостоятельное значение имеет оптимизация набора априорных данных в рамках используемой модели наблюдений.

Постановка задачи

Пусть X – случайная выборка из вероятностного выборочного пространства $\{R^k, B, P\}$ с неизвестным распределением на борелевском поле $P\{dx\}$ и плотностью по мере Лебега $f(x)$.

В роли наблюдения со значениями y в евклидовом пространстве R^k будем рассматривать нетривиальную статистику $Y = GX$, обусловленную измеримым отображением $G: R^k \rightarrow R^k$. Для сохранения в наблюдении всей полезной информации о выборке на статистику Y налагаем естественное условие достаточности. На измеримом пространстве $\{R^k, B\}$ в классе линейных преобразований $G = \{G_{ij}\}$ – это невырожденная квадратная матрица размером $k \times k$ над полем вещественных чисел, а $X = \{X_i\}, Y = \{Y_i\}$ – k -векторы (столбцы) с координатами из R^1 .

При выборе априорных данных о неизвестном распределении $R\{\cdot\}$ будем исходить, во-первых, из естественного стремления к максимальной общности формулировки задачи, и, во-вторых, из возможности

их (данных) эффективного оценивания по выборкам малых объемов.

В наибольшей степени этим условием соответствует натуральная параметризация данных, при которой используется свойство сильной состоятельности (сходимость почти, наверное) выборочных оценок неизвестных моментов распределения [6]. Будем полагать известными и ограничения в R^1 по абсолютной величине первые два момента случайных координат наблюдения Y_i .

В таком случае существуют интегралы

$$D_p(Y_i) \triangleq \int y_i^2(x) f(x) dx = \sigma_i^2 < \infty, i = \overline{1, k}, (1)$$

вычисленные по области определения вектора $x \in R^k$, где $y^0 = y - \{m_i\}$ – реализация центрированной случайной величины $Y^0 = Y - M_p(Y)$, $f(x)$ – плотность распределения вероятностей (ПРВ), σ_i^2 – дисперсия в точке наблюдения i .

Заметим, что центрированная случайная величина Y^0 – это разность между данной случайной величиной Y и её математическим ожиданием $M_p(Y)$. Математическое ожидание центрированной случайной величины Y равно нулю, а дисперсия – дисперсии данной случайной величины: $M(Y^0) = 0$, $D(Y^0) = D(Y)$.

Изопериметрическая задача вариационного исчисления

Сформулируем задачу восстановления по набору интегральных данных (1) неизвестной ПРВ $f(x)$.

Нетрудно убедиться, что в общем случае система уравнений (1) не разрешима относительно $f(x)$. Следовательно, задача требует до определения. Здесь может быть предложено несколько вариантов. Например, можно ввести ограничение на гипотетическое семейство распределений $\{P\}$, решая задачу для случая параметрической априорной неопределенности. Однако этот путь нельзя признать универсальным [5].

Альтернативой параметрическому случаю может быть вариационный подход [11], как это показано на примере классической задачи проектирования [7], в которой используется информационный критерий минимального отклонения в метрике Кульбака-Лейблера $I(P^*|P)$ оптимальной оценки распределения $P^*\{\cdot\}$ от некоторого базового распределения [12].

По аналогии с задачей проектирования применим информационный критерий к проблеме встречных гипотез. Наиболее общий результат в такой постановке дает теорема о концентрации энтропии наблюдения [13], в соответствии с которой будем искать оценку неизвестной плотности распределения из условия [14]

$$H_p(X) \triangleq - \int \log [f(x)] f(x) dx \rightarrow \max, (2)$$

при ограничениях на первые моменты (1).

Задача сведена, таким образом, к стандартной изопериметрической задаче вариационного исчисления. Нетрудно показать [12], что в данном формулировке она имеет единственное решение $f^*(x)$.

Дополним задачу (1), (2) условием нормировки распределения

$$P\{B\} \triangleq \int f(x) dx = 1, (3)$$

и после этого применим к ней метод множителей Лагранжа.

Опуская промежуточные выкладки [14], запишем полученный результат:

$$f(x) = c \exp\{-x^{\circ T} G^T \text{diag}\{\lambda_i\} G x^{\circ}\}. \quad (4)$$

Здесь c – нормирующий коэффициент; $\{\lambda_i\}$ – совокупность неопределенных множителей Лагранжа; $x^{\circ} = x - G^{-1} M_p(Y)$; T – операция транспонирования; $\text{diag}\{\lambda_i\}$ – диагональная матрица, т.е. такая квадратная матрица, в которой все элементы, находящиеся вне главной диагонали, равны нулю.

Подставляя (4) в уравнение (3), получим соотношение $c = \frac{\det G}{\prod_{i=1}^k (\pi/\lambda_i)^{0.5}}$, которое в совокупности с (1) дает систему равенств $\lambda_i = (2\sigma_i^2)^{-1}$. Здесь $\det(\cdot)$ – определитель матрицы.

В результате имеем

$$f^*(x) = \frac{\det G}{\prod_{i=1}^k (2\pi\sigma_i^2)^{0.5} \exp\{-0.5x^{\circ T} G^T \text{diag}\{\sigma_i^{-2}\} G x^{\circ}\}} \triangleq f_G(x) \quad (5)$$

и энтропию

$$H_p^*(X, G) = 0.5 \log \left[\frac{\prod_{i=1}^k (2\pi e \sigma_i^2)}{\det^2 G} \right]. \quad (6)$$

Таким образом, решение проблемы встречных гипотез по критерию максимума энтропии (2) в условиях ограниченных априорных данных (1) дает нормальный закон распределения с вектором средних и матрицей ковариаций, зависящем от вида преобразующей матрицы G .

Потенциальную точность оценки ПРВ

На множестве линейных невырожденных преобразований G формула (5) определяет параметрическое семейство нормальных законов распределения $W = \{P^*\}$, различающихся вектором средних значений $s = M_p(X)$ и видом ковариационной матрицы

$$\psi_G = (G^T \text{diag}\{\sigma_i^{-2}\} G)^{-1}.$$

В этом случае закономерен вопрос о выборе наилучшего в смысле близости к $P\{\cdot\}$ закона $P_G^*\{\cdot\}$. Ответ на него дает задача проектирования [8]

Нетрудно показать, что в данном случае расстояние Кульбака-Лейблера равно $H_p^*(X, G) - H_p(X)$ и оно убывает при уменьшении максимальной энтропии (6). Поэтому можно утверждать, что минимальные отличия от истинного имеет закон $P_G^* \subset W$, соответствующий нижней границе максимальной энтропии (6). Достижение такого минимума в рамках модели наблюдений (1) полностью зависит от выбора преобразующей матрицы G .

Используя выражение (6), сведем задачу определения оптимальной по критерию минимакса энтропии преобразующей матрицы G к вариационной задаче вида

$$G^*: \log \det^2 G \rightarrow \max$$

при ограничениях (1). В соответствии с известной методикой запишем для последующей задачи лагранжиан

$$L_G = \log \det^2 G + M_p(X^{\circ T} G^T \text{diag}\{\lambda_i\} G X^{\circ}) = \log \det^2 G + \text{tr}(\text{diag}\{\lambda_i\} G K_{XX} G^T)$$

и используем его вариацию

$$\delta L_G = \delta \log \det^2 G + \delta \text{tr}(\text{diag}\{\lambda_i\} G K_{XX} G^T).$$

Здесь $K_{XX} \triangleq M_p(X^{\circ} X^{\circ T})$ – ковариационная матрица размером $k \times k$ случайной выборки X ; $X^{\circ} = X - s$ – центрированная случайная величина; $\text{tr}(\cdot)$ – след матрицы.

Приравнявая вариацию к нулю, путем ряда вычислений, приведем к соотношению

$$G K_{XX} G^T = -\text{diag}\{1/\lambda_i\},$$

которое в совокупности с (1) дает систему очевидных равенств $\lambda_i = -\sigma_i^{-2}$, $i = \overline{1, k}$.

Таким образом, окончательно получаем

$$G^* K_{XX} G^{*T} = \text{diag}\{\sigma_i^2\},$$

или в иных обозначениях

$$\tilde{G}^* K_{XX} \tilde{G}^{*T} = I_k, \quad (7)$$

где $\tilde{G}^* = \text{diag}\{\sigma_i^{-1}\} G^*$ – нормированная преобразующая матрица; I_k – единичная матрица размером $k \times k$.

В классе эрмитовых положительно определенных ковариационных матриц K_{XX} уравнение (7) дает треугольную структуру преобразующей матрицы $\tilde{G}^* = K_{XX}^{-0.5}$ и энтропию

$$H_p^*(X, G) = 0.5 \log[(2\pi e)^k \prod_{i=1}^k (\sigma_i^2 / G_{ii}^2)]. \quad (8)$$

Таким образом, оптимальное преобразование в условиях вариационной задачи (1), (2) заключается в разложении случайной выборки X в k -базисе Карунена-Лозва, а соответствующая ему плотность распределения

$$f^*(x) = f_G(x)|_{G=G^*} = [(2\pi)^k \det K_{XX}]^{-0.5} \exp\{-0.5x^{\circ T} K_{XX}^{-1} x^{\circ}\}, \quad (9)$$

реализует потенциальную точность полученной выше оценки (5).

При неизвестной матрице K_{XX} определяющим средством G^* может быть адаптивный подход. Его реализации различаются в основном объемом (временем) выполняемых вычислений [15, 16]. С этой точки зрения более предпочтительны рекуррентные вычислительные процедуры. Экономный вариант такой реализации, не связанный с необходимостью трудоемкого обращения матриц, может быть получен по результатам предыдущего анализа.

Ограничиваясь классом треугольных матриц $\{G\}$ и возвращаясь к определению $G^* = \arg \min H_p^*(\cdot)$, где $\arg \min$ – аргумент, при котором данное выражение достигает минимума, при учете выражения (8) приходим к вариационной задаче $\prod_i \sigma_i^2(G) \rightarrow \min$ при ограничениях $G_{ii} = \text{const} \forall i$, которая сводится к k независимым задачам

$$G_i^*: G_i K_{XX} G_i^T \rightarrow \prod_i \sigma_i^2(G) \rightarrow \min, \quad G_{ii} = \text{const}, i = \overline{1, k}. \quad (10)$$

Здесь вектор $G_i \triangleq (0, \dots, 0, G_{ii}, \tilde{G}_i^T)$ определяется i -й строкой преобразующей матрицы G с элементом G_{ii} на главной диагонали и вектором ненулевых коэффициентов $\tilde{G}_i$.

Сходимость оценки ПРВ

Введем обозначение «укороченного» вектора значений центрированной выборки $\tilde{x}_{k-i} \triangleq (x_{i+1}^{\circ}, \dots, x_k^{\circ})^T$ и после этого применим к (10) метод стохастической аппроксимации [17].

Путем ряда вычислений, получим систему рекуррентных уравнений в дискретном времени $n = 1, 2, \dots$:

$$\tilde{G}_i(n) = \tilde{G}_i(n-1) - \gamma_n \tilde{x}_{k-i}(n) z_i(n), \quad z_i(n) = G_{ii} x_i + \tilde{G}_i^T(n-1) \tilde{x}_{k-i}(n). \quad (11)$$

Здесь $\{\gamma_n\}$ – переменная усиления, соответствующая условиям сходимости с вероятностью 1 выборочных оценок векторов преобразующей матрицы к их оптимальным значениям G_i^* . В теории упрощенных наилучших алгоритмов полагают, например, $\gamma_n = n^{-1}$, $n = 1, 2, \dots$

Дополняя (11) аналогичными процедурами выборочного оценивания дисперсий [18]

$$\sigma_i^2(n) = \sigma_i^2(n-1) + \gamma_n [z_i^2 - \sigma_i^2(n-1)], \quad (12)$$

на основании определения (5) и в соответствии с адаптивным байесовским подходом [4] получим выражение для эмпирической оценки неизвестной плотности вероятности по повторной случайной выборке $X_1, X_2, \dots, X_n$:

$$f_n^*(x) = (2\pi)^{-k/2} \prod_{i=1}^k \left[\frac{G_{ii}}{\sigma_i^2(n)} \right] \exp\{-0,5x^T \mathbf{G}^T(n-1) \times \times \text{diag}\{\sigma_i^{-2}(n)\} \mathbf{G}(n-1)x^0\}, \quad (13)$$

где $\mathbf{G}^T(n) \triangleq \begin{bmatrix} G_1^T(n) & | & \dots & | & G_k^T(n) \end{bmatrix}$.

Его сходимость к наилучшей оценке (9) непосредственно вытекает из свойства сходимости с вероятностью 1 итераций (11) и (12).

Динамические свойства полученной оценки распределения могут быть охарактеризованы ее кривой обучения [14]:

$$H_p^*(n) = 0,5 \log \prod_{i=1}^k \sigma_i^2(n) + \text{const} = 0,5 \log \prod_{i=1}^k [\sigma_{i0}^2(1 + a_i^2/n)] + \text{const},$$

где $\sigma_{i0}^2 = \inf \sigma_i^2(n)$; $a_i^2 = \text{const}$; $i = 1, k$.

При $n \rightarrow \infty$ кривая обучения сходится в точке

$$\inf H_p^*(n) = 0,5 \log \prod_{i=1}^k \sigma_{i0}^2 + \text{const} = 0,5 \log \det \mathbf{K}_{XX} + \text{const}.$$

Таким образом, выборочная оценка минимакса энтропии (13) сходится к оптимальному решению (9) со скоростью порядка $\log n$, что намного лучше закона двойного логарифма $\log \log n$ в теории асимптотически оптимальных ядерных оценок [10].

Сходимость оценки ПРВ (13) в метрике Кульбака-Лейблера $I(\mathbf{P}^*|\mathbf{P})$ одновременно гарантирует ее сходимость и в метрике L_1 [4]:

$$f|f_n^*(x) - f(x)|dx \leq 2\sqrt{[1 - \exp\{-I(\mathbf{P}^*|\mathbf{P})\}]} = 2\sqrt{[1 - \exp\{-\log \prod_{i=1}^k (1 + \frac{a_i^2}{n})^{0,5} - \Delta H(X)\}]},$$

где $\Delta H(X) \triangleq \inf H_p^*(n) - H(X)$.

В случае нормальной генеральной совокупности $\{X_n\}$ получим

$$H(X) = 0,5 \log \det \mathbf{K}_{XX} + \text{const}; \Delta H(X) = 0.$$

При этом верхняя граница L_1 ошибки оценивания

$$f|f_n^*(x) - f(x)|dx \leq 2\sqrt{[1 - \prod_{i=1}^k (1 + \frac{a_i^2}{n})^{-0,5}]} \rightarrow 0, \quad (14)$$

и, следовательно, метод минимакса энтропии дает асимптотически точное решение проблемы встречных гипотез. Его возможности на конечном интервале анализа проиллюстрируем на примере задачи обнаружения.

Пример задачи обнаружения сигнала

Задача обнаружения сигнала на фоне случайной помехи является частным двух альтернативных случаев задачи статистических решений [5]. Известно, что в этом случае роль оптимальной решающей статистики выполняет отношение правдоподобия $\Lambda(x)$. Будем полагать сигнал детерминированным и заданным k -вектором эквидистантных отсчетов s . В отношении распределения действующей помехи ограничимся информацией о дисперсиях k ее отсчетов с периодом наблюдения сигнала T .

При обычном формализме адаптивного байесовского подхода в непараметрическом варианте [4] в данной ситуации получим выражение отношения правдоподобия через выборочную оценку неизвестной плотности распределения помехи в дискретном времени $n = 1, 2, \dots$ вида

$$\Lambda_n(x) = f_n^*(x-s)/f_n^*(x).$$

После несложных преобразований, при которых используется определение оценки (13), окончательно имеем

$$\Lambda_n(x) = \exp\left\{\frac{\sum_{i=1}^k x^T(n) G_i^T(n-1) G_i(n-1) s}{\sigma_i^2} + \text{const}\right\}.$$

При этом первые k слагаемых в показателе экспоненты

$$\lambda_n(x) = \frac{\sum_{i=1}^k x^T(n) G_i^T(n-1) G_i(n-1) s}{\sigma_i^2} = \sum_{i=1}^k z_i(n) m_i(n) / \sigma_i^2,$$

определяют минимальную решающую статистику в задаче обнаружения.

Структурная схема синтезированного обнаружителя показана на рис. 1.

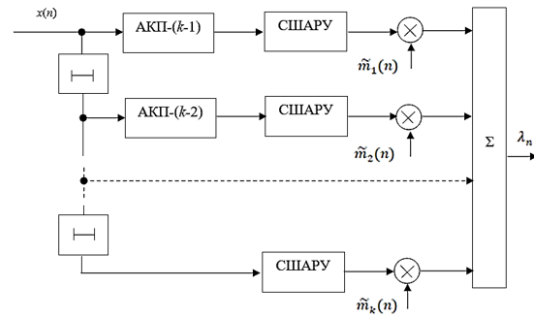


Рис. 1. Структурная схема синтезированного обнаружителя

Переменная $z_i(n) = G_i(n-1)x(n)$, формируемая согласно (11) при замене централизованного процесса $x^0(n)$ смесью сигнала и помехи, характеризует, как известно [17], отклик корреляционного автокомпенсатора помех (АКП) $(i-1)$ -го порядка, $i = 1, k$.

Результат деления $z_i(n)/\sigma_i(n)$ можно рассматривать как нормированный отклик, формируемый на выходе системы шумовой автоматической регуляции усиления (СШАРУ) [18]. При этом $m_i(n) = G_i(\cdot)s$ – это отклик АКП на полезный сигнал в текущем времени n , а $\tilde{m}_i(n) = m_i(n)/\sigma_i(n)$ – напряжение сигнала на выходе СШАРУ в i -м канале обработки. Произведение под знаком суммы в выражении для решающей статистике определяют взвешенные отклики наблюдений в каждом канале, а результатом их суммирования является корреляционная обработка наблюдений. Таким образом, в данном примере отражены все основные принципы оптимальной обработки [15].

Оценка эффективности синтезированного обнаружителя на конечном интервале наблюдения $[1; n]$ может быть проведена путем исследования поведения в динамике величины вероятности ошибочного решения β_n [5].

Используя известный в теории оптимальных байесовских решений при M альтернативных результатов [4]

$$0 \leq \beta_n - \beta^* \leq \sum_{m=0}^{M-1} \int |p_m f_n^*(x|m) -$$

$$-p_m f(x|m)|dx,$$

где $\beta^* = \inf \beta_n$, m – номер альтернативы, p_m – ее априорная вероятность ($\sum p_m = 1$).

Для случая $M = 2$ (задача обнаружения), $f(x|1) = f(x-s)$ и $f_n^*(x|1) = f_n^*(x-s)$, с учетом инвариантности L_1 -ошибки относительно параметра сдвига, получим

$$0 \leq \beta_n - \beta^* \leq \int |f_n^*(x) - f(x)|dx.$$

Это соотношение совместно с (14) определяет характер изменения β_n при действии гауссовских помех:

$$0 \leq \beta_n - \beta^* \leq 2 \sqrt{1 - \prod_{i=1}^k \left(1 + \frac{a_i^2}{n}\right)^{-0.5}} = 2 \sqrt{1 - \prod_{i=1}^k \frac{\sigma_{i0}}{\sigma_i(n)}}.$$

Таким образом, эффективность обнаружения (см. рис. 1) ограничена сверху дисперсиями остатков помехи на выходах АКП различных порядков. При $n \rightarrow \infty$ величина β_n сходится почти, наверное, к потенциально достижимой вероятности ошибки β^* .

Количественно этот процесс может быть охарактеризован набором относительных величин

$$\alpha_i(n) = \frac{\sigma_i^2(n)}{\sigma_i^2(n-1)}, \quad i = \overline{1, k}.$$

В общем случае имеем

$$\alpha_i(n) = \frac{1 + \frac{a_i^2}{n}}{1 + \frac{a_i^2}{n-1}},$$

или в условиях малых выборок (при $\frac{a_i^2}{n} \gg 1$ [14])

$\alpha_i(n) = 1 - 1/n$ при всех i .

Полученный результат определяет порядок скорости сходимости последовательности величин $\{\beta_n\}$ к оптимальному значению β^* и может быть использован для сравнительной оценки эффективности синтезированного обнаружителя с его известными адаптивными аналогами [5, 15].

Например, при обнаружении сигнала s на фоне гауссовской помехи X_n с неизвестной корреляционной матрицей K_{XX} классический адаптивный подход реализуется в решающей статистике

$$\tilde{x}_n = x^T(n) K^{-1}(n, k) s,$$

с использованием выборочной состоятельной оценки корреляционной матрицы

$$K(n, k) = \frac{n-1}{nK(n-1, k)} + \frac{1}{n\tilde{x}_k(n)\tilde{x}_k^T(n)}$$

размером $k \times k$ [16].

Эффективность такого подхода может быть охарактеризована формулой (15) после подстановки в нее набора собственных чисел выборочной оценки корреляционной матрицы

$$\tilde{\sigma}_i^2(n) = [\Gamma_i^T K^{-1}(n, i) \Gamma_i]^{-1},$$

где $\Gamma_i^T = (1, 0, \dots, 0)$ – вектор-строка размером i .

Используя рекуррентное выражение для обращения выборочной оценки корреляционной матрицы размером $i \times i$

$$K^{-1}(n, i) = \frac{n}{(n-1)K^{-1}(n-1, i)} - \frac{n}{(n-1)^2 K^{-1}(n-1, i)} \times \tilde{x}_i(n) \tilde{x}_i^T(n) K^{-1}(n-1, i) \times \left[1 + \frac{1}{(n-1) \tilde{x}_i(n) \tilde{x}_i^T(n) K^{-1}(n-1, i)}\right]^{-1}, \quad i = \overline{1, k},$$

путем прямых вычислений получим набор оценок снизу для собственных чисел

$$\tilde{\sigma}_i^2(n) \geq \frac{n-1}{n\tilde{\sigma}_i^2(n-1)}$$

или

$$\frac{\tilde{\sigma}_i^2(n)}{\tilde{\sigma}_i^2(n-1)} \geq 1 - \frac{1}{n} \geq \frac{\sigma_i^2(n)}{\sigma_i^2(n-1)}$$

для всех i .

Таким образом, синтезированный обнаружитель имеет устойчивый выигрыш в динамических характеристиках по сравнению с классическим адаптивным обнаружителем.

Заключение

Рассмотрены вопросы, связанные с применением принципа минимакса энтропии в задачах статистических решений по ограниченным наблюдениям в корабельных радиотехнических системах. На основе информационного критерия минимакса энтропии наблюдений получено выражение решающей статистики по первым двум моментам неизвестного распределения. Рассмотрен и проанализирован вариационный подход к проблеме непараметрической априорной неопределенности. Показано, что наилучшие результаты предложенный подход дает для многомерных выборок из нормальной генеральной совокупности, причем, в указанных условиях достигается асимптотически точное решение проблемы встречных гипотез. Во всех других ситуациях выборочная оценка минимакса энтропии определяет ортопроекцию неизвестного распределения на параметрическое семейство нормальных законов. Скорость сходимости полученной оценки имеет порядок $\log n$, что намного лучше закона «двойного логарифма» в теории асимптотически оптимальных оценок плотностей. Однако, данное преимущество можно считать существенным лишь при конечных (малых) интервалах наблюдения. В задачах с большими ресурсами времени эффективность вариационного подхода можно повысить путем распространения модели исходных данных на выборочные моменты высших порядков. На основе полученных результатов синтезирован обнаружитель сигнала на фоне случайной помехи. Показано, что по сравнению с классическим адаптивным обнаружителем, он имеет устойчивый выигрыш в динамических характеристиках.

Литература

1. Никитин В.С., Моисеев Н.И. Перспективные корабельные системы прямой радиосвязи. – СПб, 2004. 224 с.
2. Байрашевский А.М., Жерлаков А.В., Ильин А.А., Ничипоренко Н.Т., Сапегин В.Б. Судовая радиоэлектроника и радионавигационные приборы. - Москва: Транспорт, 1988. — 271 с.
3. Дуров А.А., Кан В.С., Ничипоренко Н.Т., Устинов Ю.М. Судовые радиолокационные системы и САРП. Учебник для вузов. – П.Камчатский. КамчатГТУ, 2005. – 280 с.
4. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1989. 656 с.
5. Стратонович Р. Л. Принципы адаптивного приема. М.: Сов. радио, 1973. 143 с.
6. Ибрагимов И. А., Хасьяминский Р. З. Асимптотическая теория оценивания. М.: Наука, 1979. 528 с.
7. Деврой Л., Дьерфи Л. Непараметрическое оценивание плотности: L_1 -подход. М.: Мир, 1988. 407 с.

8. Ченцов Н. Н. Статистические решающие правила и оптимальные выводы. М.: Наука, 1972. 520 с.
9. Чайлдс Д. Дж., Скиннер Д. П., Кемерейт Р. Ч. Кепстр и его применение при обработке данных. Обзор // ТИИЭР. 1977. 65, № 10. С. 5–21.
10. Иоффе М. О., Катковник В. Я. Необходимые и достаточные условия сходимости с вероятностью 1 ядерных оценок плотности вероятности и ее производных // Автоматика и телемеханика. 1986. № 12. С. 33–42.
11. Bai H., Taylor C. N. A Variational Bayesian Approach for Estimating System Parameters and Process Noise // In Processing 2020 IEEE 23rd International Conference on Information Fusion. 06-09 July 2020, Rustenburg, South Africa. DOI: 10.23919/FUSION45008.2020.9190234
12. Кульбак С. Теория информации и статистика. М.: Наука, 1967. 408 с.
13. Джейнс Э. Т. О логическом обосновании методов максимальной энтропии // ТИИЭР. 1982. 70, № 9. С. 33–51.
14. Миллер М. И., Снайдер Д. Л. Роль правдоподобия и энтропии в задачах с неполными данными: Приложения к задачам оценивания интенсивности точечных процессов и условных теплицевых ковариаций // ТИИЭР. 1987. 75, № 7. С. 31–50.
15. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.
16. Shabanov Kirill A., Vlasov Sergey M., Arustamov Sergey A. Research of Signal Adaptive Filtering Algorithms // In Processing 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). 25-29 March 2024, Sochi, Russian Federation. DOI: 10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10515582
17. Савченко В. В. Рекуррентный метод параллельного спектрального анализа // Автоматика и телемеханика. 1988. № 10. С. 101–110.
18. Wu M.-W., Jin Ya., Li Ya., Song T., Kam P.-Yu. Maximum-Likelihood, Magnitude-Based, Amplitude and Noise Variance Estimation // IEEE Signal Processing Letters. 2021. 28. Issue 5. P. 414–418. DOI: 10.1109/LSP.2021.3055464

References

1. Nikitin V.S., Moiseev N.I. Promising shipboard direct radio communication systems. – St. Petersburg, 2004. 224 p.
2. Bayrashevsky A.M., Zherlakov A.V., Ilyin A.A., Nichiporenko N.T., Sapegin V.B. Shipboard radio electronics and radio navigation devices. Moscow: Transport Publ., 1988. 271 p.
3. Durov A.A., Kan V.S., Nichiporenko N.T., Ustinov Yu.M. Ship radar systems and SARPs. Textbook for universities. – P.Kamchatsky. KAMCHATGTU, 2005. 280 p.
4. Levin B. R. Theoretical foundations of statistical radio engineering. Moscow: Soviet Radio, 1989. 656 p.
5. Stratonovich R. L. Principles of adaptive reception. Moscow: Soviet Radio, 1973. 143 p.
6. Ibragimov I. A., Khasminsky R. Z. The asymptotic theory of estimation. Moscow: Nauka, 1979. 528 p.
7. Devroy L., Györfi L. Nonparametric density estimation: An L1 approach. Moscow: Mir, 1988. 407 p.
8. Chentsov N. N. Statistical decisive rules and optimal conclusions. Moscow: Nauka Publ., 1972. 520 p.
9. Childers D. J., Skinner D. P., Kemereit R. C. Kepstr and its application in data processing. Review // TI
10. Ioffe M. O., Katkovnik V. Ya. Necessary and sufficient conditions for convergence with probability 1 of nuclear estimates of probability density and its derivatives // Automation and telemechanics. 1986. No. 12. pp. 33-42.
11. Bai H., Taylor C. N. A Variational Bayesian Approach for Estimating System Parameters and Process Noise // In Processing 2020 IEEE 23rd International Conference on Information Fusion. 06-09 July 2020, Rustenburg, South Africa. DOI: 10.23919/FUSION45008.2020.9190234
12. Kulbak S. Information theory and statistics. Moscow: Nauka Publ., 1967. 408 p.
13. Jaynes E. T. On the logical justification of maximum entropy methods // TIIEP. 1982. 70, No. 9. pp. 33-51.
14. Miller M. I., Snyder D. L. The role of likelihood and entropy in problems with incomplete data: Applications to problems of estimating the intensity of point processes and conditional greenhouse covariances // TIIEP. 1987 75, No. 7. pp. 31-50.
15. Shirman Ya. D., Manzhos V. N. Theory and technique of radar information processing against interference. Moscow: Radio and Communications, 1981.
16. Shabanov Kirill A., Vlasov Sergey M., Arustamov Sergey A. Research of Signal Adaptive Filtering Algorithms // In Processing 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). 25-29 March 2024, Sochi, Russian Federation. DOI: 10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10515582
17. Savchenko V. V. Recurrent method of parallel spectral analysis // Automation and telemechanics. 1988. No. 10. pp. 101-110.
18. Wu M.-W., Jin Ya., Li Ya., Song T., Kam P.-Yu. Maximum-Likelihood, Magnitude-Based, Amplitude and Noise Variance Estimation // IEEE Signal Processing Letters. 2021. 28. Issue 5. P. 414–418. DOI: 10.1109/LSP.2021.3055464

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

Артюшенко Владимир Михайлович, доктор технических наук, заведующий кафедрой информационных технологий и управляющих систем Технологического университета им. А.А. Леонова, 141074, Московская область, ул. Гагарина, д. 42, e-mail: artuschenko@mail.ru

Vladimir M. Artyushenko, Dr. Sci, Head of the Department of Information Technologies and Control Systems, Technological University named after A.A. Leonov, 141074, Moscow Region, Korolev, Gagarin st. 42, e-mail: artuschenko@mail.ru

Евгений Кимович Самаров, доктор технических наук, декан факультета естественных наук Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: omega511@mail.ru

Eugene K. Samarov, Dr. Sci, Dean of the Faculty of Natural Sciences, St. Petersburg State Maritime Technical University, 190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya st., 3, e-mail: omega511@mail.ru

Воловач Владимир Иванович, доктор технических наук, директор Высшей школы передовых производственных технологий Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования, Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти, 445677, г. Тольятти, ул. Гагарина, 4, e-mail: volovach.vi@mail.ru

Vladimir I. Volovach, Dr. Sci, Director of the Higher School of Advanced Production Technologies, Volga region State University of Service, Tolyatti, 445677, Tolyatti, Gagarin st., 4, e-mail: volovach.vi@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 05.11.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.01.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 11.02.2026.

Научная статья

УДК 639.2/.3:51-7; 639.2/.3:007; 681.5.017

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.020>

Беспроводная система управления маломерным промысловым катамараном ПК-2

Ражев А.О.¹ aleksej.razhev@klgtu.ru, **Недоступ А.А.**¹ nedostup@klgtu.ru,
Насенков П.В.¹ pavel.nasenkov@klgtu.ru, **Коновалова К.В.**¹ karina.konovalova@klgtu.ru,
Сергеев Е.И.¹ pyrojaeger@gmail.com, **Волошин А.А.**¹ arthur.voloshin@yandex.ru
¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Цель автоматизации тралового промысла – сделать процесс лова более эффективным, безопасным, рентабельным и экологически устойчивым. В статье поставлена задача исследования: разработка структуры и функциональности программно-аппаратного комплекса системы управления и мониторинга процесса траления, работающей в полуавтоматическом режиме. Обоснован выбор элементной базы, разработаны функциональная и структурная схемы, предсказательная математическая модель поведения трала в процессе траления. Предложены новые методы, аппаратные и программные решения, удешевляющие и упрощающие создание системы путем применения смартфона, уменьшающие количество и повышающих точность средств измерений за счет применения математической модели и фильтра Калмана. Обозначены области применения результатов исследования: разработка и изготовление маломерного промыслового катамарана ПК-2, а также опытного образца беспроводной системы контроля параметров трала с элементами искусственного интеллекта «Авто-трал». Апробация результатов исследования будет проводиться на изготавливаемом маломерном промысловом катамаране ПК-2 и изготовленном разноглубинном трале.

Ключевые слова: беспроводная система управления, автоматизация, искусственный интеллект, предсказательное моделирование, рыболовный трал, промысловый комплекс.

Финансирование: Исследование выполнено в Калининградском государственном техническом университете в рамках выполнения государственного задания Росрыболовства по теме «Разработка беспроводной системы контроля параметров трала с элементами искусственного интеллекта «Автотрал»».

Для цитирования: Ражев А.О., Недоступ А.А., Насенков П.В., Коновалова К.В., Сергеев Е.И., Волошин А.А. Беспроводная система управления маломерным промысловым катамараном ПК-2, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 195—204. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.020.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.020>

The wireless control system for the small fishing catamaran FC-2

Alexey O. Razhev¹ root@digitechlab.ru, **Alexander A. Nedostup**¹ nedostup@klgtu.ru,
Pavel V. Nasenkov¹ pavel.nasenkov@klgtu.ru, **Karina V. Konovalova**¹ karina.konovalova@klgtu.ru,
Egor I. Sergeev¹ pyrojaeger@gmail.com, **Artur A. Voloshin**¹ arthur.voloshin@yandex.ru
¹Kaliningrad State Technical University, Russian Federation

Abstract. The purpose of automated trawling is to make the fishing process more efficient, safe, cost-effective and environmentally sustainable. The research objective is to develop the structure and functionality of a hardware and software complex for controlling and monitoring the trawling process, operating in half-automatic mode. The choice of the element base is justified, functional and structural diagrams are developed, and a predictive mathematical model of the trawl behavior during the trawling process is developed. New methods, hardware and software solutions are proposed that reduce the cost and simplify the creation of a system by using a smartphone, reducing the number and increasing the accuracy of measuring instruments through the use of a mathematical model and a Kalman filter. The areas of application of the research results are outlined: the development and manufacture of a small fishing catamaran FC-2, as well as a prototype of a wireless trawl parameter monitoring system with elements of artificial intelligence "Auto-trawl". The results of the study will be tested on a manufactured small fishing catamaran FC-2 and a manufactured midwater trawl.

Key words: wireless control system, automation, artificial intelligence, predictive modeling, fishing trawl, fishing complex.

Financial Support: The research was carried out at the Kaliningrad State Technical University within the framework of the state assignment of the Federal Agency for Fishery of the Russian Federation on the topic "Development of a wireless trawl parameter monitoring system with elements of artificial intelligence "Autotrawl".

For citation: Alexey O. Razhev, Alexander A. Nedostup., Pavel V. Nasenkov, Karina V. Konovalova, Egor I. Sergeev, Artur A. Voloshin. The wireless control system for the small fishing catamaran FC-2, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 195—204. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.020.

Введение

Цель автоматизации тралового промысла [1] – сделать процесс лова более эффективным, безопасным, рентабельным и экологически устойчивым.

С экономической точки зрения [2] траление – очень энергозатратный процесс. Энергопотребление и расход топлива – самая большая статья расходов. Для понижения энергозатрат необходимо в реальном времени контролировать сопротивление трала, скорость судна, угол атаки траловых досок и др. Автоматические сортировочные линии, рыбонасосы (при пелагическом тралении) и системы обработки позволяют быстрее и с меньшими трудозатратами разбирать, сортировать и замораживать улов. Это увеличивает объемы добычи за рейс. Гидроакустические комплексы и системы сбора данных помогают точнее находить косяки рыбы, определять их размер и вид, что сокращает время на траление.

С точки зрения влияния человеческого фактора автоматизация тралового лова повышает безопасность палубной команды. Операторы могут дистанционно управлять лебедками, траловыми досками и другими системами с мостика или из пульты, а не работать вручную на скользкой и опасной палубе с движущимися под огромной нагрузкой тросами. Автоматика страхует людей от ошибок при выборе режимов работы, например, предотвращает перегрузки и обрывы тросов, которые могут привести к травмам. Датчики и системы видеонаблюдения позволяют контролировать обстановку на палубе в сложных погодных условиях.

Автоматизация также способствует улучшению качества улова. Чем быстрее улов извлекается из воды, тем выше его качество. Автоматизация ускоряет этот процесс до максимума. Современные системы, такие как рыбонасосы при лове путассу, сайры или криля, позволяют доставлять рыбу из трала на борт без механических повреждений, которые неизбежны при использовании традиционных грузовых стрел и сетных ящиков.

С точки зрения экологичности [3] при разноглубинном лове автоматизация помогает удерживать трал на нужной глубине и с нужной геометрией, что предотвращает контакт со дном водоема и минимизирует пагубное влияние на

бентос. Системы видеомониторинга в реальном времени и датчики в трале позволяют производить мониторинг обстановки внутри трала, что помогает избежать прилова молоди или нецелевых видов [4]. Применение электродвигателей с аккумуляторными батареями взамен двигателей внутреннего сгорания сокращает вредные выбросы.

И, наконец, автоматизация может способствовать решению проблемы нехватки кадров, позволяя уменьшить численность палубной команды, сделав работу рыбодобытчиков менее физически тяжелой и более технологичной. Более того, автоматизация тралового лова требует от работников новых навыков и компетенций в части эксплуатации и обслуживания сложного специализированного программного обеспечения, электроники, вычислительной техники, датчиков и исполнительных механизмов, что способствует привлечению кадров из других отраслей.

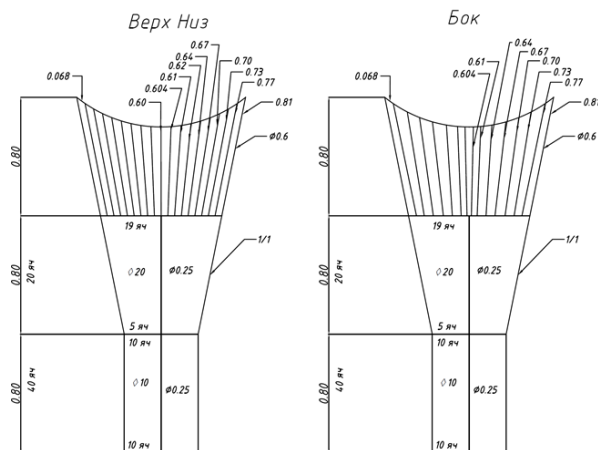
1. Постановка задачи

Задачей настоящего исследования является разработка структуры и функциональности программно-аппаратного комплекса системы управления и мониторинга процесса траления, работающей в полуавтоматическом режиме. Апробация результатов исследования будет проводиться на маломерном промысловом катамаране ПК-2 и разноглубинном трале.

Исследования в данной области часто носят прикладной или закрытый характер (военные/государственные разработки). По информации из открытых источников [5] можно выделить разработки систем полуавтоматического управления тралом (автоспуск, автоподъем, контроль раскрытия) Scanmar (Норвегия), систем траления морских неконтактных мин (РФ, США), а также научно-исследовательские проекты EU (FP7, Horizon 2020), направленные на селективное траление, минимизирующее ущерб экосистеме.

Разноглубинный трал был разработан и изготовлен на кафедре промышленного рыболовства Калининградского государственного технического университета магистром Меньщиковым К.В. При изготовлении использовались нитевидные материалы из сверхвысокомолекулярного полиэтилена марки Дунеема.

Чертеж трала приведен на рис. 1.



На рис. 2 и 3 показан разрабатываемый и изготавливаемый на кафедре промышленного рыболовства Калининградского государственного

технического университета маломерный промысловый катамаран ПК-2.

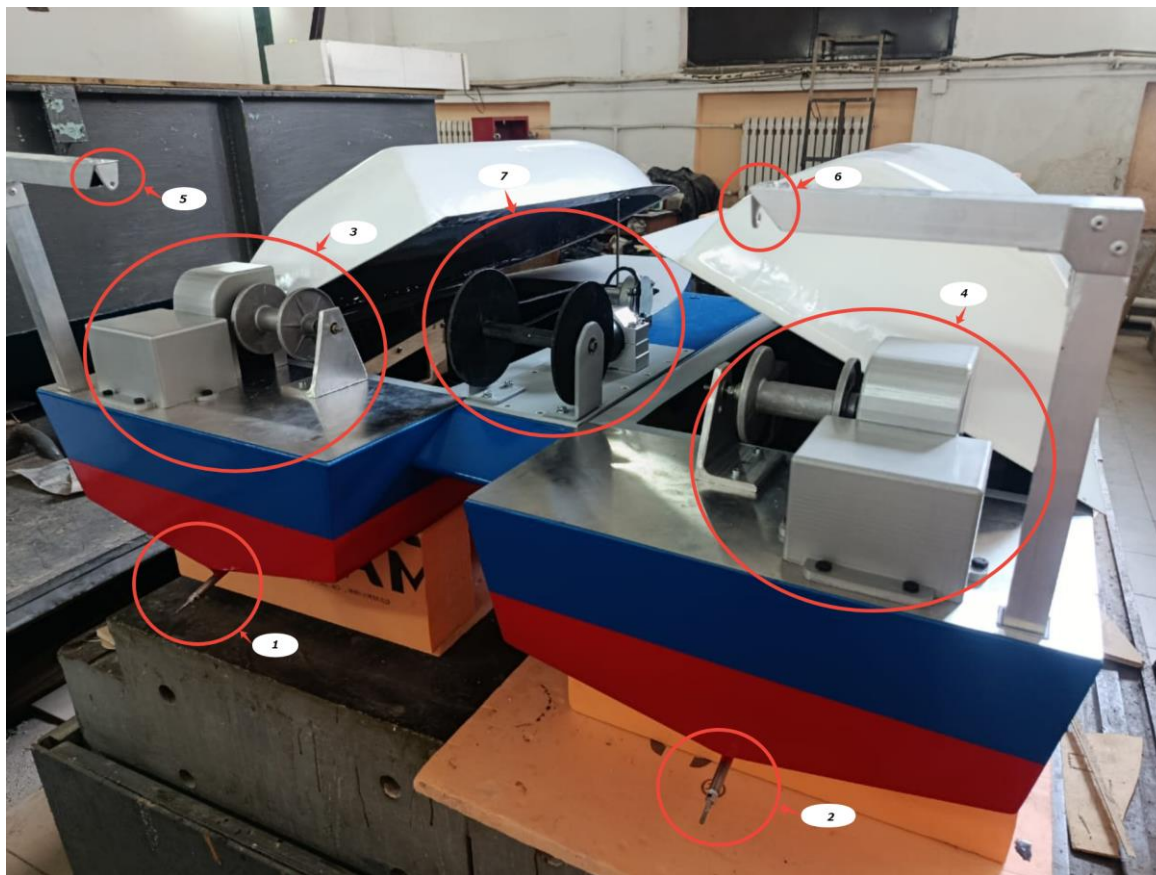


Рис. 2. Промысловый катамаран ПК-2 (вид сзади)



Рис. 3. Промысловый катамаран ПК-2 (вид спереди)

На рис. 2 сносками обозначены: 1 и 2 – оси левого и правого силового агрегата соответственно; 3 и 4 – левая и правая траловые лебедки соответственно; 5 и 6 – места крепления левого и правого блоков с датчиками натяжения, оборотов и угла наклона ваеров; 7 – кабельно-сетной барабан.

При разработке структуры и функциональности системы ставится задача достижения поставленной цели при минимальных затратах на изготовление модели и опытного образца с использованием доступных материалов и комплектующих преимущественно отечественных производителей.

2. Материалы и методы

С целью упрощения конструкции в качестве судна был использован катамаран с двумя гребными винтами, находящимися на осях силовых агрегатов (см. сноска 1 и 2 на рис. 2). Поворот катамарана осуществляется не путем изменения вектора тяги при помощи рулевого механизма, а путем создания крутящего момента вокруг вертикальной оси катамарана за счет перераспределения тяги между винтами. Таким образом автоматы тяги и курса судна технически совмещены.

В состав каждого силового агрегата входит шесть двигателей постоянного тока, соединенных с осью винта ременными передачами. Электрически все двигатели агрегата соединены параллельно. Таким образом обеспечивается повышение отказоустойчивости всего агрегата – выход из строя одного двигателя приведет к потере максимальной мощности без прекращения работы всего силового агрегата. Более того, наличие ременных передач предотвращает серьезные поломки агрегата в случае аварийных нагрузок на винт и заклинивания одного из двигателей, что способствует увеличению живучести и уменьшению аварийности. При данной аварийной ситуации выйдет из строя только недорогой ремень, который достаточно легко заменить на новый.

Для управления тралом на катамаране установлены две траловые лебедки (см. сноска 3 и 4

на рис. 2), по одной на ваер. Для выборки трала на катамаране установлен кабельно-сетной барабан (см. сноску 7 на рис. 2). Траловые лебедки и канатно-сетной барабан имеют электрический привод. Как и у

силовых агрегатов, они приводятся в движение двигателем постоянного тока.

Функциональная схема системы управления приведена на рис. 4.

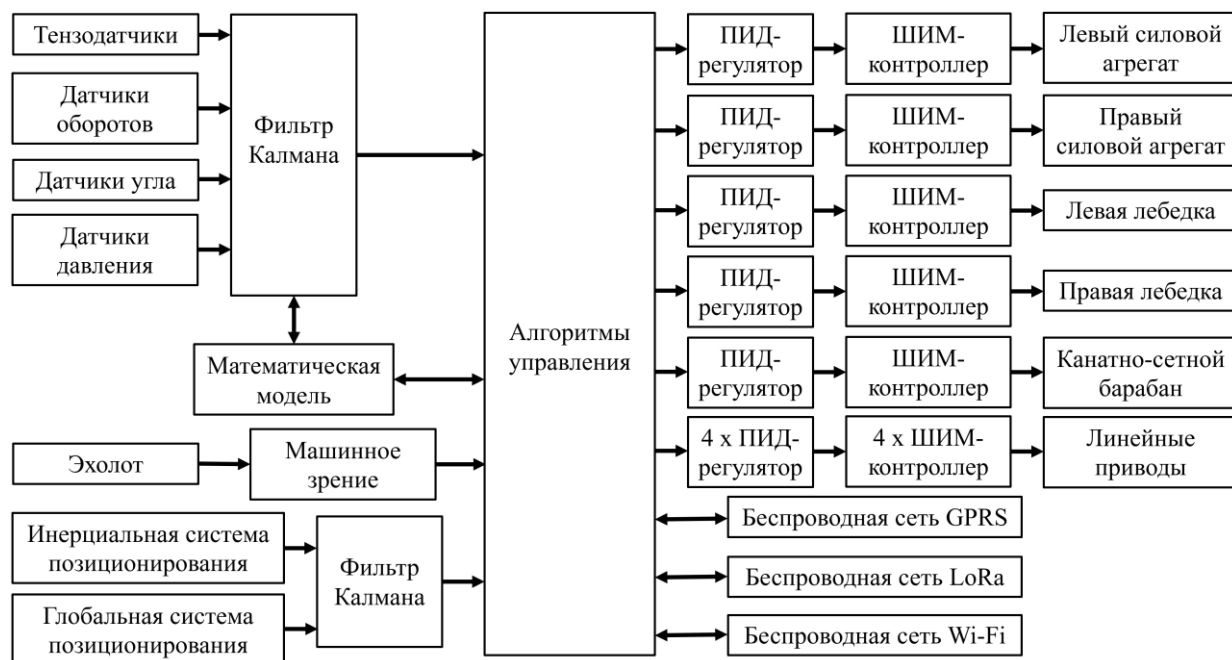


Рис. 4. Функциональная схема системы управления

Для работы системы необходимо измерять натяжение в ваерах, углы наклона ваеров в горизонтальной плоскости и их длину. Для этой цели на катамаране будут установлены блоки, через которые будут переброшены ваера. Места крепления блоков указаны сносками 5 и 6 на рис. 2. Натяжение в ваерах предлагается измерять тензодатчиком, закрепленным между креплением блока и самим блоком с последующим пересчетом значений. Для измерения угла наклона ваеров и их длины на каждом блоке предполагается использовать оптические датчики поворота и счетчик оборотов.

Все двигатели постоянного тока, установленные на катамаран, могут работать в реверсивном режиме с переменной скоростью вращения и мощностью. Это обеспечивается блоками управления двигателями, выполняющими функции широтно-импульсной модуляции силового напряжения (ШИМ-контроллера) от аккумуляторной батареи с возможностью изменения полярности (для изменения направления вращения).

Регулирование глубины траления обычно выполняется при помощи изменения скорости траления и длины ваеров. Для того, чтобы расширить диапазон рабочих глубин при ограниченных диапазонах скоростей траления и удаления трала от судна, была разработана конструкция управляемой траловой доски. Ее особенностью является возможность изменять как распорную силу, так и крутящий момент, что позволяет регулировать крен и создавать дополнительную подъемную/заглубляющую силу. Принцип работы управляемой траловой доски аналогичен принципу работы крыльев самолета, только вместо элеронов используются средние щитки с изменяемым при помощи линейных приводов углом атаки. В каждой траловой доске имеется по два подвижных средних

щитка, расположенных в верхней и нижней ее половинах.

Задание вертикального и горизонтального раскрытия устья трала выполняется изменением как скорости траления, так и распорной силой траловых досок.

Для осуществления обратной связи с тралом в систему контроля необходимо добавить средства измерения основных его параметров – датчики. Для определения величины вертикального раскрытия устья трала, глубины траления и угла атаки меридиана траловой оболочки предлагается использовать четыре датчика давления, установленные на траловых досках, верхней и нижней подборах. При этом глубину траления брать как среднее между показаниями датчиков на верхней и нижней подборах, считая, что устье трала имеет форму эллипса, а угол атаки меридиана траловой оболочки вычислять исходя из значений глубины траления и глубины погружения траловых досок с учетом конструктивных параметров канатной части трала.

Для уточнения показаний датчиков предлагается использовать математическую модель работы траловой системы и фильтр Калмана [6, 7], представляющий собой программный алгоритм, который позволяет оптимальным образом оценить состояние изменяющейся во времени системы используя серию неточных и зашумленных измерений. Алгоритм использует математическую модель чтобы спрогнозировать следующее состояние системы.

Фильтр Калмана используется для уточнения показаний датчиков на трале и данных о положении, ориентации в пространстве, линейных и угловых скоростях и ускорениях, полученных от GPS и магнитометра (компы) смартфона, данных от

оператора мобильной связи (по сотовым вышкам), данным от инерциальной системы смартфона (акселерометры, инклинометры) по математической модели движения судна и талла.

Рассмотрим математическую модель разноглубинного талла, в которой устье талла имеет форму эллипса [8]. Свяжем геометрию устья талла с силовыми характеристиками талла уравнением

$$H/L = e^{1 - (R_{yd1} + R_{yd2})/(Q+G)}, \quad (1)$$

где H – вертикальное раскрытие устья талла; L – горизонтальное раскрытие устья талла; R_{yd1} и R_{yd2} – распорные силы левой и правой талловой доски соответственно; Q – подъемная сила гидродинамического щитка; G – вес в воде грузов-углубителей и цепи.

Площадь устья талла F_u определяется по формуле расчета площади эллипса

$$F_u = \frac{\pi}{4} HL. \quad (2)$$

Свяжем площадь устья талла с силовыми характеристиками талла уравнением

$$F_u / F_f = 1 - e^{-0,0008 \frac{R_{yd1} + R_{yd2} + Q + G}{F_0 (R_x + R_{хщ})}}, \quad (3)$$

где F_f – фиктивная площадь талловой оболочки; F_0 – относительная площадь сети; R_x – сила лобового сопротивления талла; $R_{хщ}$ – сила сопротивления гидродинамического щитка.

Свяжем силовые характеристики талла с углом атаки меридиана талловой оболочки α (в градусах) уравнениями

$$R_x = (0,04\alpha - 0,09) \frac{\rho v^2}{2} F_H, \quad (4)$$

$$\left(\alpha - 110e^{-6,74F_0} \left(1,02 - e^{-0,0008 \frac{R_{yd1} + R_{yd2} + Q + G}{F_0 (R_x + R_{хщ})}} \right) \right) \times \left(1 - e^{-4,5 \frac{R_{yd1} + R_{yd2} + Q + G}{R_x + R_{хщ}}} \right) = \alpha \quad (5)$$

где F_H – площадь нитевидных материалов талла; ρ – плотность воды; v – скорость траления.

В (1) – (5) значение G постоянно в процессе траления; Q и $R_{хщ}$ вычисляются исходя из геометрических характеристик гидродинамического щитка и скорости траления; R_{yd1} и R_{yd2} зависят от скорости траления и гидродинамических коэффициентов талловых досок, которые в свою очередь определяются их формой и могут изменяться в процессе траления при помощи регулирования угла атаки среднего щитка талловой доски, являясь параметрами уравнений; F_f , F_0 и F_H являются конструктивными характеристиками талла и постоянны в процессе траления. Таким образом при заданных скорости траления и значениях гидродинамических коэффициентов талловых досок, подставив (2) в (3) мы получим систему из четырех

уравнений с четырьмя неизвестными H , L , α и R_x , имеющую решение.

На рис. 5 представлена расчетная система координат судна. Положение талловых досок в расчетной системе координат опишем уравнениями (6) – (11):

$$l_{B1}^2 = x_{B1}^2 + y_{B1}^2 + z_{B1}^2, \quad (6)$$

$$l_{B2}^2 = x_{B2}^2 + y_{B2}^2 + z_{B2}^2, \quad (7)$$

$$y_{B1} = \sqrt{x_{B1}^2 + z_{B1}^2} \sin \beta_1, \quad (8)$$

$$y_{B2} = \sqrt{x_{B2}^2 + z_{B2}^2} \sin \beta_2, \quad (9)$$

$$R_x = T_{B1} \frac{x_{B1}}{l_{B1}} + T_{B2} \frac{x_{B2}}{l_{B2}}, \quad (10)$$

$$G + 2G_B - Q - R_{zd1} - R_{zd2} = T_{B1} \frac{z_{B1}}{l_{B1}} + T_{B2} \frac{z_{B2}}{l_{B2}} \quad (11)$$

где l_{B1} и l_{B2} – длина ваеров; x_{B1} и x_{B2} – расстояние от талловых досок до судна в основной плоскости судна; y_{B1} и y_{B2} – расстояние от талловых досок до диаметральной плоскости судна; z_{B1} и z_{B2} – глубина погружения талловых досок; β_1 и β_2 – углы наклона ваеров к оси Ox в основной плоскости судна; T_{B1} и T_{B2} – силы натяжения в ваерах; G_B – вес талловой доски в воде; R_{z1} и R_{z2} – подъемная сила талловых досок.

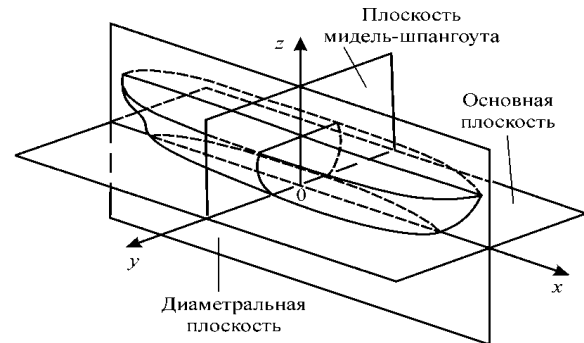


Рис. 5. Расчетная система координат судна

Подъемные силы R_{zd1} и R_{zd2} зависят от скорости траления и гидродинамических коэффициентов досок, которые в свою очередь определяются их формой и могут изменяться в процессе траления при помощи регулирования угла атаки среднего щитка талловой доски, являясь параметрами уравнения (11). Длина ваеров l_{B1} и l_{B2} , углы наклона ваеров β_1 и β_2 и силы натяжения в ваерах T_{B1} и T_{B2} измеряются при помощи датчиков, установленных на судне, а не на талле на удалении. Поэтому погрешность их измерения минимальна, и можно считать, что они известны и являются параметрами уравнений (10) и (11). Таким образом система уравнений (6) – (11) разрешается относительно шести неизвестных x_{B1} , x_{B2} , y_{B1} , y_{B2} , z_{B1} и z_{B2} .

Вычисление гидродинамических коэффициентов талловых досок можно производить при помощи

табличной функции, аргументом которой является положение регулятора угла атаки среднего щитка траловой доски.

Задача ПИД-регуляторов в схеме управления двигателями (см. рис. 4) – максимально точно и быстро привести управляемую величину к заданному значению, минимизировав ошибку, и поддерживать ее, компенсируя возмущения [9]. Применение ПИД-регуляторов является одной из фундаментальных и самых распространенных концепций в теории автоматического управления. В предлагаемом решении ПИД-регулятор реализован в виде алгоритма в системе управления, который формирует управляющий сигнал на ШИМ-контроллер на основе ошибки регулирования – разницы между установочным значением, полученным от алгоритма управления системой, и текущим значением управляемой величины, вычисленным или полученным от датчиков с коррекцией фильтром Калмана по математической модели.

Для слежения оператором за косяком рыб в системе предусмотрен беспроводной эхолот. Данные с эхолота обрабатываются и выводятся на экран программным обеспечением, поставляемым производителем эхолота для смартфонов и планшетов. Для передачи данных алгоритмам управления предлагается осуществлять захват видео с экрана смартфона и дальнейшую их обработку при помощи разработанных в процессе выполнения научного исследования алгоритмов

машинного зрения, основанных на искусственном интеллекте.

Управление движением катамарана осуществляется с помощью разрабатываемых алгоритмов, обрабатывающих данные, полученные от оператора посредством беспроводной связи, с учетом данных, полученных от систем позиционирования. Для повышения надежности используется как глобальная, так и инерциальная системы. В случае плохого качества сигнала со спутников глобальной системы позиционирования, приоритет отдается данным о положении и скорости перемещения судна, которые вычисляются при помощи инерциальной системы методом интегрирования линейных и угловых ускорений. Недостатком данного метода является образование накопительной ошибки измерений.

Информация с обеих систем поступает на фильтр Калмана, где и происходит окончательная ее обработка с учетом приоритетности. Приоритет для определения положения судна и его скорости отдается глобальной системе позиционирования. При определении ускорений приоритетной является инерциальная система, что связано с ее большей точностью при определении ускорений. В результате мы получаем, что в зависимости от приоритета данные воспринимаются фильтром либо как прогнозные, либо как результат измерений.

На рис. 6 показана структурная схема системы управления промысловым катамараном ПК-2.

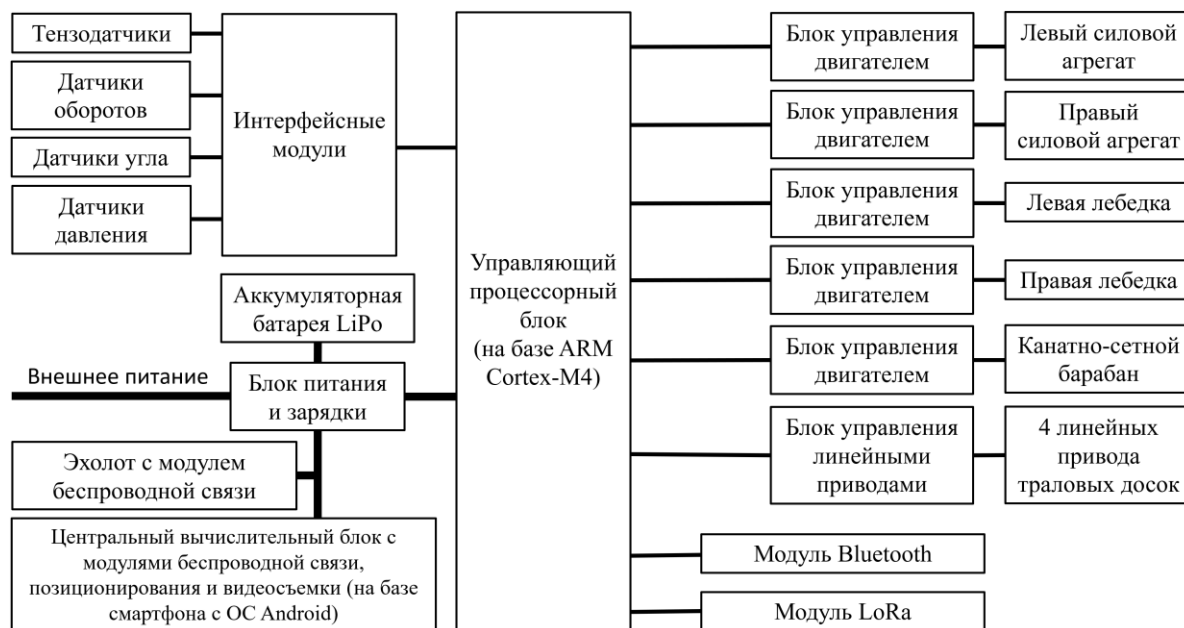


Рис. 6. Структурная схема системы управления промысловым катамараном ПК-2

Система основана на двух вычислительных блоках (ЭВМ): управляющем – на базе микроконтроллера ARM Cortex-M4 (см. рис. 7) и центральном – на базе смартфона с операционной системой Android.

Управляющий блок (см. рис. 8) связывает датчики с исполнительными устройствами, а также получает запросы от и возвращает ответы в центральный вычислительный блок. Блок выполняет низкоуровневые критически важные алгоритмы реального времени, в том числе по предотвращению

аварийных ситуаций. Данный блок конструктивно вместе с интерфейсными модулями, а также модулями связи Bluetooth и LoRa планируется реализовать на Arduino-совместимых комплектов.

Центральный блок имеет большую производительность, на нем реализованы все высокоуровневые алгоритмы. Конструктивно блок реализован в виде смартфона. Выбор в пользу смартфона был сделан из-за его доступности, отсутствия необходимости в приобретении

дополнительных комплектующих. В современном смартфоне уже интегрировано множество необходимых модулей таких, как модули беспроводной сотовой связи, Wi-Fi, Bluetooth; модули глобальной и инерциальной систем позиционирования; видекамера для передачи окружающей обстановки оператору, дающая оператору возможность перехода на ручное

дистанционное управление. Более того, программное обеспечение эхолота может работать на этом же смартфоне, что в целом уменьшает затраты на изготовление модели и опытного образца системы, а в дальнейшем - принесет экономию при серийном производстве маломерных рыболовных судов.

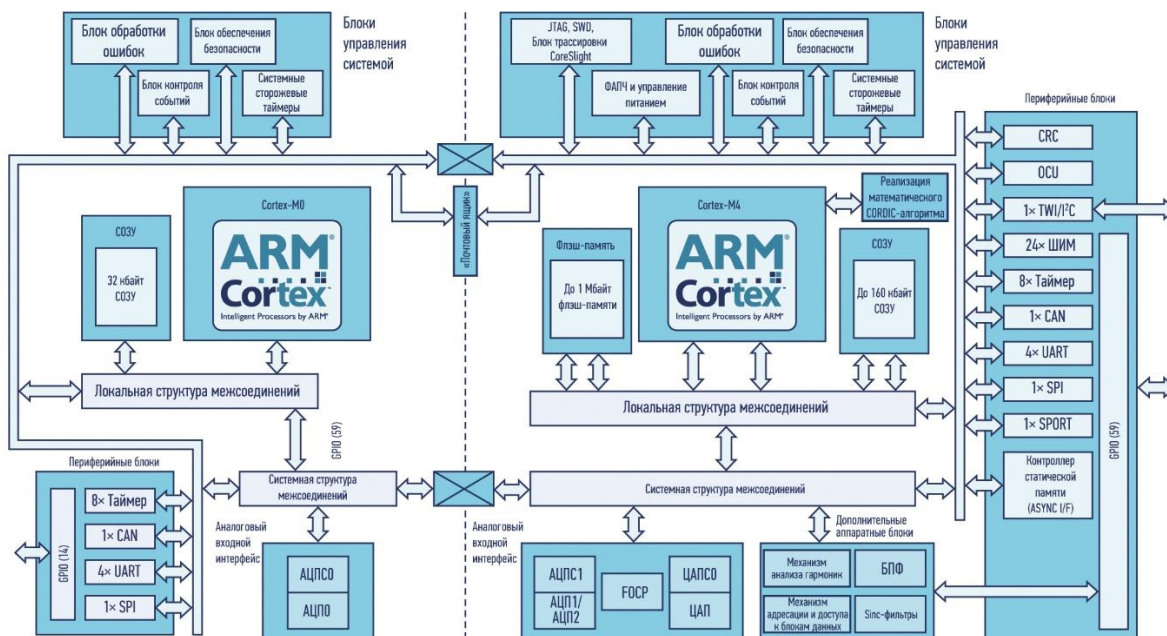


Рис. 7. Структурная схема микроконтроллера ARM Cortex-M4

Возможны как перебои со связью, так и геолокации с ее плохим качеством или полным отсутствием.

Второй вид связи – с использованием технологий LoRa/LoRaWAN [10] (см. рис. 9).

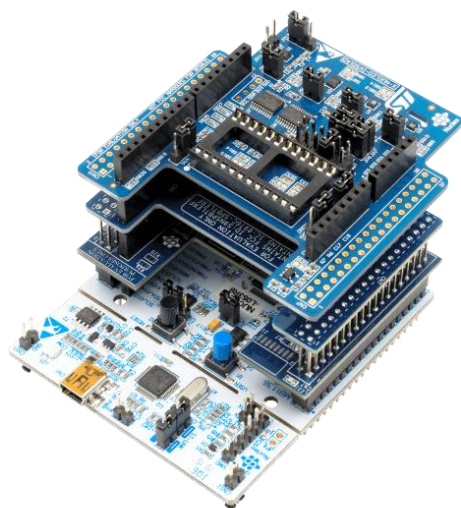


Рис. 8. Управляющий процессорный блок на базе ARM Cortex-M4

Связь между двумя вычислительными блоками, а также между центральным вычислительным блоком и эхолотом осуществляется по беспроводному каналу Bluetooth.

С целью повышения надежности связи с внешним миром предлагается реализовать с использованием нескольких технологий. Основная связь – мобильная (GPRS/3G/4G ...). Ее достоинства – высокая скорость. Недостаток – ненадежность работы.

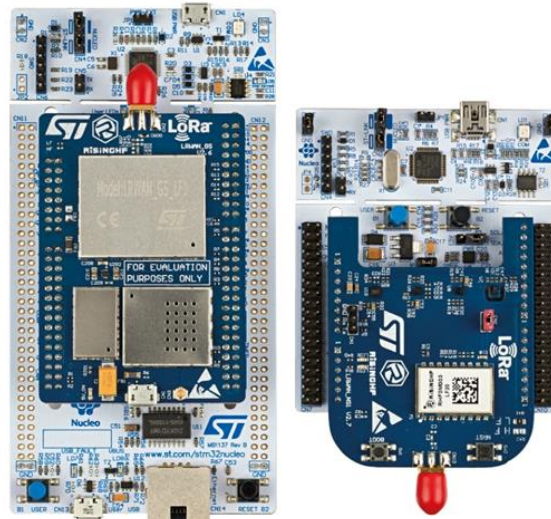


Рис. 9. Модуль LoRa / LoRaWAN

Данный вид связи позволяет передавать данные на большие расстояния. Недостатком LoRa является ее низкая скорость, что делает невозможным передачу больших объемов данных, например видео.

Третий вид связи – Wi-Fi. Связь по Wi-Fi имеет высокую скорость и надежность. Ее использование

не зависит от сторонних поставщиков – все оборудование размещается в районе промысла. Недостаток – небольшие расстояния между узлами сети, что требует нахождения оператора в непосредственной близости к рыболовному судну либо наличия плотной сети узлов в районе промысла.

Блоки управления двигателями планируется приобретать в виде готовых комплектующих (см. рис. 10).

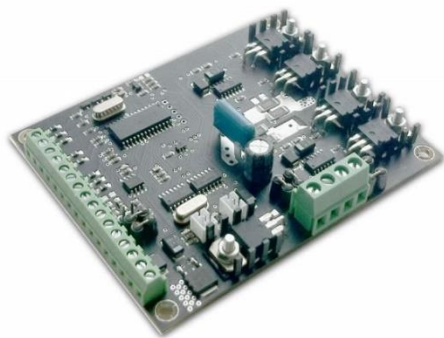


Рис. 10. Блок управления двигателем

Данные блоки будут выбраны исходя из требуемой мощности двигателя и напряжения его питания. Связь блоков с управляющим процессорным блоком планируется реализовать по PWM-интерфейсу с использованием дополнительного сигнала, определяющего направление вращения двигателя.

2. Результаты

По результатам исследования была разработана программа для ЭВМ «Беспроводной мониторинг промыслового судна ПК-2», работающая на смартфоне с операционной системой Android (см. рис. 11).

Программа для ЭВМ предназначена для определения скорости, положения и ориентации в пространстве промыслового катамарана ПК-2 для

последующей их обработки и передачи по беспроводным каналам связи на сервер. При определении используются встроенные инерциальная и навигационная системы смартфона. Смартфон устанавливается на беспилотном судне.

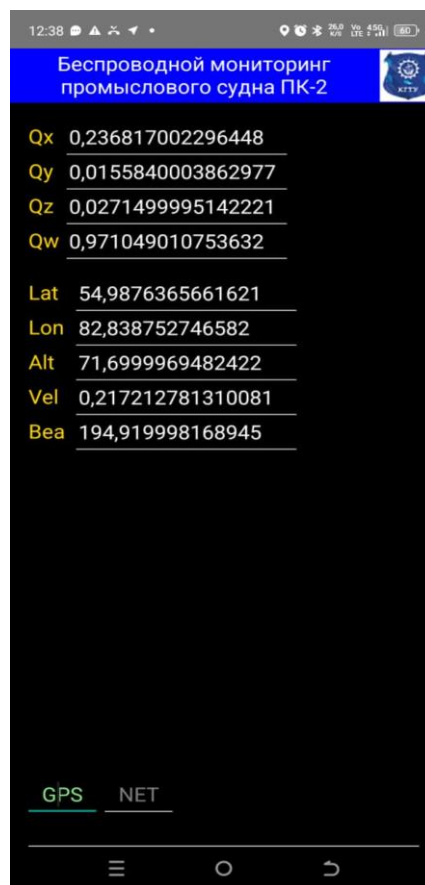


Рис. 11. Программа для ЭВМ «Беспроводной мониторинг промыслового судна ПК-2»

Информация о состоянии катамарана передается по беспроводным каналам связи на веб-сервер для дальнейшей визуализации посредством веб-браузера (см. рис. 12).

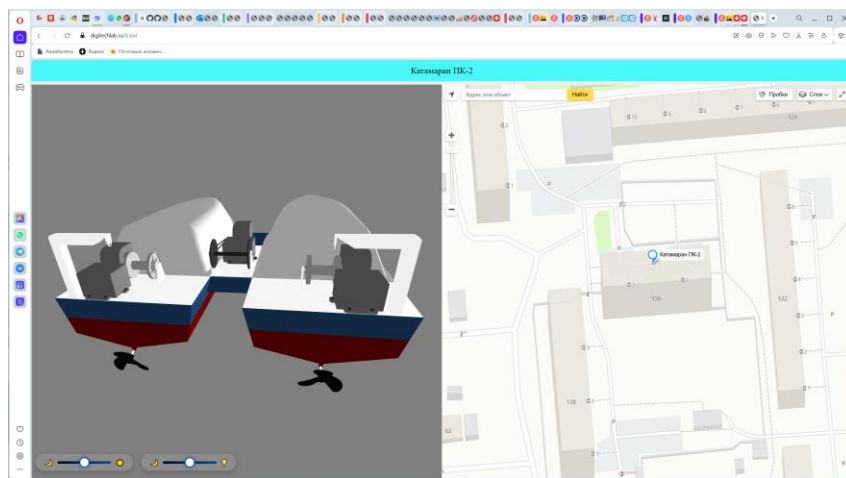


Рис. 12. Визуализация промыслового катамарана ПК-2 посредством веб-браузера

В результате исследования был обоснован выбор элементной базы беспроводной системы управления маломерным промысловым катамараном ПК-2 с

целью достижения поставленной цели при минимальных затратах на изготовление модели и опытного образца. Разработаны функциональная и

структурная схемы системы. Разработана предсказательная математическая модель поведения трала в процессе траления.

Заключение

Автоматизация тралового лова – это не просто замена людей машинами. Это комплексная трансформация всего процесса, которая направлена на то, чтобы сделать промышленное рыболовство экономически выгодным и экологически безопасным.

Новизна исследования заключается в предложении методов, аппаратных и программных решений, удешевляющих и упрощающих создание

опытного образца путем использования интегрированных в смартфон модулей, а также уменьшающих количество и повышающих точность средств измерений в виде датчиков за счет применения математической модели и фильтра Калмана.

Полученные результаты будут использованы при разработке и изготовлении маломерного промыслового катамарана ПК-2, а также опытного образца беспроводной системы контроля параметров трала с элементами искусственного интеллекта «Автотрал».

Литература

1. Prakash S., Thakur M. (2019). A Review on Trawl Gear and Monitoring Systems for Responsible Fishing. *Journal of Aquatic Biology & Fisheries*, 7, 40–48.
2. Driscoll J., Tyedmers P. (2010). Fuel use and greenhouse gas emission implications of fisheries management: the case of the New England Atlantic herring fishery. *Marine Policy*, 34(3), 353–359.
3. Bartholomew D. C., Mangel J. C., Alfaro-Shigueto J., Reed J. R. (2021). Remote electronic monitoring (REM) as a tool for fisheries management and sustainability. *Fish and Fisheries*, 22(5), 1053–1067.
4. Kindt-Larsen L., Dalskov J., Larsen F. (2019). Fully documented fishery: a tool to support a catch quota management system. *ICES Journal of Marine Science*, 76(4), 897–905.
5. Pettersen J.H., Grande E.M. (2019). Fuel efficiency in demersal trawling: The role of gear monitoring and control systems. *Applied Ocean Research*, 85, 12–21.
6. Kalman R. E. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transactions of the ASME—Journal of Basic Engineering*, Vol. 82 (Series D), 35–45.
7. Ражев А.О., Недоступ А.А. Метод определения поведенческих характеристик стаи рыб с применением технологий математического моделирования и искусственного интеллекта, *Морские интеллектуальные технологии*. 2024. № 4 часть 1, С. 340—348. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.040.
8. Недоступ А.А. Исследование гидродинамического коэффициента сопротивления тралов : специальность 05.18.17 «Промышленное рыболовство» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Недоступ Александр Алексеевич, 1999. – 194 с.
9. Сидоров С.С. Адаптивный алгоритм управления // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – 2019. – № 3. – С. 120–135.
10. Farah S., Khan B., Ali A., Gong C. (2022). A Review on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies. *Future Internet*, 14(9), 263.

References

1. Prakash S., Thakur M. (2019). A Review on Trawl Gear and Monitoring Systems for Responsible Fishing. *Journal of Aquatic Biology & Fisheries*, 7, 40–48.
2. Driscoll J., Tyedmers P. (2010). Fuel use and greenhouse gas emission implications of fisheries management: the case of the New England Atlantic herring fishery. *Marine Policy*, 34(3), 353–359.
3. Bartholomew D. C., Mangel J. C., Alfaro-Shigueto J., Reed J. R. (2021). Remote electronic monitoring (REM) as a tool for fisheries management and sustainability. *Fish and Fisheries*, 22(5), 1053–1067.
4. Kindt-Larsen L., Dalskov J., Larsen F. (2019). Fully documented fishery: a tool to support a catch quota management system. *ICES Journal of Marine Science*, 76(4), 897–905.
5. Pettersen J.H., Grande E.M. (2019). Fuel efficiency in demersal trawling: The role of gear monitoring and control systems. *Applied Ocean Research*, 85, 12–21.
6. Kalman R. E. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transactions of the ASME—Journal of Basic Engineering*, Vol. 82 (Series D), 35–45.
7. Razhev A.O., Nedostup A.A. (2024). Metod opredeleniya povedencheskikh kharakteristik stai ryb s primeneniyem tekhnologiy matematicheskogo modelirovaniya i iskusstvennogo intellekta [A method for determining the behavioral characteristics of a school of fish using mathematical modeling and artificial intelligence technologies], *Morskiye intellektualnyye tekhnologii*. 4(1), 340–348. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.040.
8. Nedostup A.A. (1999). Issledovaniye gidrodinamicheskogo koeffitsiyenta soprotivleniya tralov : spetsialnost 05.18.17 "Promyshlennoye rybolovstvo" [Investigation of the hydrodynamic coefficient of trawl resistance : specialty 05.18.17 "Industrial fishing"], *Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. 194 p.
9. Sidorov S.S. (2019). Adaptivnyy algoritm upravleniya [Adaptive control algorithm], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*. 3, 120–135.
10. Farah S., Khan B., Ali A., Gong C. (2022). A Review on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies. *Future Internet*, 14(9), 263.

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

Ражев Алексей Олегович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела НИОКР УНИД, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: aleksej.razhev@klgtu.ru

Aleksey O. Razhev, Ph.D. (Eng), Leading Researcher of the R&D Department of the Office of Scientific Research Activities, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: aleksej.razhev@klgtu.ru

Недоступ Александр Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: nedostup@klgtu.ru

Alexander A. Nedostup, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: nedostup@klgtu.ru

Насенков Павел Владимирович, старший преподаватель кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: pavel.nasenkov@klgtu.ru

Pavel V. Nasenkov, Senior Lecturer of the Department of Commercial Fisheries, Kaliningrad State Technical University, 1 Sovetsky Prospekt, Kaliningrad, 236022, e-mail: pavel.nasenkov@klgtu.ru

Коновалова Карина Витальевна, ведущий инженер лаборатории кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: karina.konovalova@klgtu.ru

Karina V. Konovalova, Leading engineer of the laboratory of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: karina.konovalova@klgtu.ru

Сергеев Егор Ильич, аспирант кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: pyrojaeger@gmail.com

Egor I. Sergeev, graduate student of the Department of Commercial Fisheries, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky Prospekt, 1, e-mail: pyrojaeger@gmail.com

Волошин Артур Александрович, аспирант кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: arthur.voloshin@yandex.ru

Artur A. Voloshin, graduate student of the Department of Commercial Fisheries, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: arthur.voloshin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию / the article was submitted 12.11.2025.

Одобрена после рецензирования / approved after reviewing 15.02.2026.

Принята к публикации / accepted for publication 19.03.2026.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING

Научная статья

УДК 629.584

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.021>

Метод синтеза системы группового управления беспилотными летательными аппаратами, реализующей стратегию «лидер-ведомый», на основе технологии UWB

Юхимец Д.А.^{1,2} undim@iacp.dvo.ru, Губанков А.С.^{1,2} gubankov@iacp.dvo.ru

¹Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, ²МГУ им. адм. Г.И. Невельского

Аннотация. В работе предложен метод синтеза системы группового управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), движущимися в режиме «лидер-ведомые» и выполняющие полетные задания в автоматическом режиме в сложных навигационных и морских гидрометеорологических условиях. В группе выделяется БПЛА-лидер, который, двигаясь в автономном режиме или под управлением оператора, задает движение всей группы. При этом остальные БПЛА назначаются ведомыми и движутся за лидером в определенной строю, сохраняя свое заданное положение относительно лидера. В процессе указанного движения предполагается, что информация о текущих координатах БПЛА группы недоступна, а на лидере стоит радиомаяк стандарта UWB (Ultra Bandwidth), с помощью которого БПЛА-ведомые могут определять дистанцию до лидера. Также по каналу связи UWB лидер может передавать ведомым информацию о параметрах своего движения, измеренными бортовыми датчиками. Морские испытания запланированы на навигационный период 2026 г.

Ключевые слова: Беспилотный летательный аппарат, сложные метеорологические условия, групповое управление, групповая навигация, нелинейные системы управления, фильтр частиц.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 24-29-00489)

Для цитирования: Юхимец Д.А., Губанков А.С. Метод синтеза системы группового управления беспилотными летательными аппаратами, реализующей стратегию «лидер-ведомый», на основе технологии UWB, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 205—213. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.021.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.021>

Group control system synthesis method for unmanned aerial vehicles for "leader-follower" strategy based on UWB technology

Dmitry A. Yukhimets^{1,2} undim@iacp.dvo.ru, Anton S. Gubankov^{1,2} gubankov@iacp.dvo.ru

¹Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, ²Admiral Nevelskoy Maritime State University

Abstract. The paper proposes a method for synthesizing a group control system for unmanned aerial vehicles (UAV) moving in the "leader-follower" mode and performing flight tasks in automatic mode in difficult navigation and marine hydrometeorological conditions. A leader UAV defined in the group, which, moving offline or under the control of an operator, sets the movement of the entire group. At the same time, the remaining UAV are assigned as followers and move behind the leader in a certain formation, maintaining their preset position relative to the leader. During this movement, it is assumed that information about the current coordinates of the group's UAV is unavailable, and the leader has a UWB (Ultra Bandwidth) radio beacon, with which the UAV-followers can determine the distance to the leader. Also, through the UWB communication channel, the leader can transmit information to the followers about the parameters of his movement, measured by on-board sensors. Sea experiments are planned for the navigation period of 2026.

Keywords: Unmanned aerial vehicle, difficult meteorological conditions, group control, group navigation, nonlinear control systems, particle filter.

Financial Support: This work is supported by Russian Scientific Foundation (grant 24-29-00489).

For citation: Dmitry A. Yukhimets, Anton S. Gubankov. Group control system synthesis method for unmanned aerial vehicles for "leader-follower" strategy based on UWB technology, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 205—213. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.021.

Введение

В настоящее время область использования БПЛА существенно расширяется. При этом они активно используются для решения различных задач с борта морских судов (поисковые и спасательные операции,

разведка ледовой обстановки, транспортные задачи между судами). Указанные операции часто выполняются в автоматическом режиме в сложных навигационных и морских гидрометеорологических условиях [1-4].

При этом существует достаточно большое количество задач, которые могут эффективно выполняться группой БПЛА, двигающихся в заданном строю в режиме «лидер-ведомые»: поиск объектов на поверхности и в глубине водной среды, спасательные операции, транспортировка небольших грузов (медикаменты, оборудование и т.д.) [3]. Выполнение таких миссий не предполагает телеуправление всеми БПЛА группы, так как для этого требуется большое количество операторов, а также большое количество каналов связи. При этом автономное управление БПЛА с использованием сигналов спутниковых навигационных систем может быть недоступно, что не позволит реализовать согласованное движение группы БПЛА.

В настоящее время существует множество работ, посвященных групповому управлению мобильных робототехнических систем [5-7], к которым также относятся и БПЛА.

В работе [8] рассматривается проблема управления группой БПЛА в режиме «лидер-ведомые». В работе предлагается аналитическое решение проблемы управления строем БПЛА на основе геометрического подхода. Однако такой подход малоприменим на практике, так как динамика БПЛА описывается в виде двойного интегратора, а вся информация о движении всех БПЛА доступна, что на практике не встречается.

В работе [9] предлагается метод синтеза распределенной системы управления большой группой БПЛА, которая учитывает топологию связей между этими БПЛА, а также возможность переконфигурирования этих связей. Однако в этом методе основное внимание уделяется анализу и учету топологии коммуникаций между БПЛА, но при этом считается, что БПЛА могут измерять свое местоположение в абсолютной системе координат (АСК) и обмениваться этой информацией с другими БПЛА.

В работе [10] представлен подход к управлению большой группой БПЛА, двигающихся в условиях окружающей обстановки, содержащей препятствия. Метод позволяет сформировать для каждого БПЛА безопасную траекторию, которая будет отработана с помощью двухуровневой нелинейной системы управления. При этом указанная система управления также должна иметь информацию о положении всех БПЛА группы.

Однако на практике, особенно в морских условиях, часто возникают ситуации, когда определение координат БПЛА затруднено из-за отсутствия или нестабильности сигналов спутниковых навигационных систем. Это делает большинство систем группового управления БПЛА неработоспособными.

Таким образом, в работе решается задача разработки метода синтеза системы группового управления БПЛА, движущихся в режиме «лидер-ведомые», которая включает в себя систему автономной локальной навигации БПЛА-ведомых относительно БПЛА-лидера, функционирующую без использования спутниковых навигационных систем, а также систему управления движением БПЛА-ведомого, обеспечивающего его удержание относительно БПЛА-лидера на заданной позиции.

Постановка задачи

В работе рассматривается движение группы БПЛА в режиме «лидер-ведомые». В этом режиме в группе один БПЛА назначается лидером, а остальные БПЛА группы – ведомыми, которые следуют за лидером в заданном строю, сохраняя свое желаемое положение относительно лидера. При этом траекторию движения группы задает лидер, выполняя миссию в автономном режиме или двигаясь под управлением оператора.

В процессе движения и маневрирования для сохранения заданного строя БПЛА-ведомые должны иметь информацию о своем текущем положении относительно БПЛА-лидера. При этом в работе считается, что информация о положении каждого БПЛА группы в АСК является недоступной. Схема движения группы БПЛА в режиме лидер-ведомые показана на рис. 1.

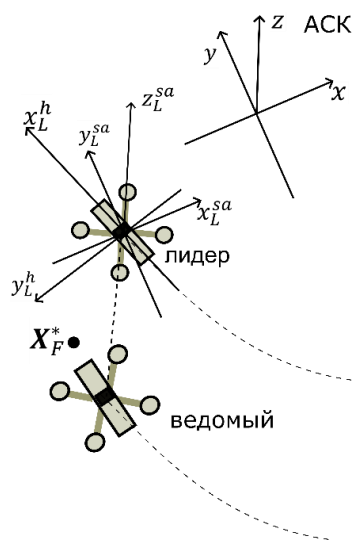


Рис. 1. Схема движения лидер-ведомые

Желаемое положение ведомого задается в системе координат $x_L^h y_L^h z_L^h$, связанной с лидером, где ось x_L^h совпадает с продольной осью БПЛА, а ось z_L^h параллельна вертикальной оси АСК. Это позволяет сохранять без искажений заданное построение ведомых при различных маневрах лидера.

При этом положение ведомого относительно лидера удобно определять в полусвязанной с лидером системе координат (СК) $x_L^{sa} y_L^{sa} z_L^{sa}$, где центр координат совпадает с центром связанной СК лидера, а направление ее осей совпадает с направлением осей АСК. Это позволяет упростить расчеты, так как из модели движения ведомого относительно лидера исключаются вращательные движения лидера и ведомого, которые не влияют на величину дистанции между ними.

В работе считается, что каждый БПЛА имеет набор бортовых датчиков, который позволяет ему измерять углы ориентации, угловые скорости, высоту и линейные скорости в системе координат, связанной с этим БПЛА.

Предполагается, что на лидере установлен UWB-маяк, а на БПЛА-ведомых установлены UWB-приемники, позволяющие измерять расстояние между лидером и ведомыми, а также передавать им данные о скорости движения, угле курса и высоте лидера.

На борту лидера установлен только один маяк, так как из-за малых размеров БПЛА расстояние между маяками будет небольшим, и погрешности измерений расстояний будут слишком сильно влиять на точность определения положения ведомого относительно лидера с помощью традиционных методов трилатерации. Однако использование только одного маяка не позволяет однозначно определить координаты ведомого относительно лидера, что ставит задачу разработки метода локальной навигации БПЛА-ведомого, на основе данных о параметрах движения лидера и ведомого, а также дистанции между ними. Кроме того, дополнительно возникает задача разработки системы управления ведомого, позволяющей обеспечить поддержание заданного положения БПЛА-ведомого относительно лидера с использованием данных, поступающих от системы локальной навигации.

Математическая модель БПЛА

В работе используется модель динамики БПЛА, квадрокоптерного типа, описываемая следующей системой уравнений [11]:

$$\begin{aligned}\dot{u} &= rv - qw + g \cdot \sin\theta - d_x(u_r + u_r|u_r|), \\ \dot{v} &= pw - ru - g\cos\theta\sin\varphi - d_y(v_r + v_r|v_r|), \\ \dot{w} &= qu - pv - g\cos\theta\cos\varphi - \frac{T_z}{m_{UAV}} - d_z(w_r + w_r|w_r|), \\ \dot{p} &= \frac{(J_{yy} - J_{zz})qr}{J_{xx}} + \frac{M_x}{J_{xx}}, \\ \dot{q} &= \frac{(J_{zz} - J_{xx})pr}{J_{yy}} + \frac{M_y}{J_{yy}}, \\ \dot{r} &= \frac{(J_{xx} - J_{yy})pq}{J_{zz}} + \frac{M_z}{J_{zz}},\end{aligned}\quad (1)$$

где $\mathbf{v} = [u, v, w]^T$ – вектор линейных скоростей БПЛА в связанной системе координат (ССК); $\boldsymbol{\omega} = [p, q, r]^T$ – вектор угловых скоростей БПЛА в ССК; φ, θ – углы крена и тангажа БПЛА; m_{UAV} – масса БПЛА; J_{xx}, J_{yy}, J_{zz} – моменты инерции БПЛА относительно осей ССК; d_x, d_y, d_z – коэффициенты сил сопротивления воздуха вдоль осей ССК БПЛА; $\mathbf{v}_r = [u_r, v_r, w_r]^T$ – вектор линейной скорости БПЛА относительно воздуха, рассчитываемый по формуле $\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - \mathbf{v}_a^b$, $\mathbf{v}_a^b = [v_{ax}^b, v_{ay}^b, v_{az}^b]$ – вектор скорости ветра в ССК; g – ускорение свободного падения.

Кинематическая модель движения БПЛА в АСК описывается матрицей перехода из ССК в АСК следующего вида:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{A} \end{bmatrix} &= J \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} J_v & 0 \\ 0 & J_\omega \end{bmatrix}, \\ J_v &= \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & -s_\psi c_\theta + c_\psi s_\theta s_\varphi & s_\psi s_\theta + c_\psi c_\theta s_\varphi \\ s_\psi c_\theta & c_\psi c_\theta + s_\psi s_\theta s_\varphi & -c_\psi s_\theta + s_\psi c_\theta s_\varphi \\ -s_\theta & c_\theta s_\varphi & c_\theta c_\varphi \end{bmatrix}, \\ J_\omega &= \begin{bmatrix} 1 & s_\varphi t g_\theta & c_\varphi t g_\theta \\ 0 & c_\varphi & -s_\varphi \\ 0 & s_\varphi / c_\theta & c_\varphi / c_\theta \end{bmatrix},\end{aligned}\quad (2)$$

где $\mathbf{X} = [x, y, z]^T$ – вектор координат БПЛА в АСК; $\mathbf{A} = [\varphi, \theta, \psi]^T$ – вектор угловых координат (крен, тангаж, курс) БПЛА в АСК.

Для дальнейшего синтеза системы управления модель (1), (2) удобно представить в матричной форме:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{v}} &= \mathbf{R}_v \mathbf{v} + \mathbf{D} \mathbf{v} + \mathbf{G} + m_q^{-1} \mathbf{F}, \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} &= \mathbf{I}^{-1} \mathbf{R}_\omega \mathbf{I} \boldsymbol{\omega} + \mathbf{I}^{-1} \mathbf{M}, \\ \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{X}} \\ \dot{\mathbf{A}} \end{bmatrix} &= \mathbf{J} \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}, \\ \mathbf{I} &= \begin{bmatrix} J_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & J_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & J_{zz} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_v = \begin{bmatrix} 0 & r & -q \\ -r & 0 & p \\ q & -p & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} -d_x(u_r + u_r|u_r|) & 0 & 0 \\ 0 & -d_y(v_r + v_r|v_r|) & 0 \\ 0 & 0 & -d_z(w_r + w_r|w_r|) \end{bmatrix},\end{aligned}\quad (3)$$

где $\mathbf{I}$ – матрица инерции БПЛА. В случае его симметричности указанная матрица может считаться диагональной.

Далее для синтеза системы управления БПЛА-ведомым будем рассматривать модель динамики в виде (3).

Синтез системы локальной навигации для БПЛА-ведомого

Основная проблема при синтезе навигационной системы является недостаточность одного определения дистанции между БПЛА-лидером и БПЛА-ведомым для локализации положения ведомого относительно лидера. Указанную неоднозначность предполагается разрешать с помощью следующего подхода (см. рис. 2).

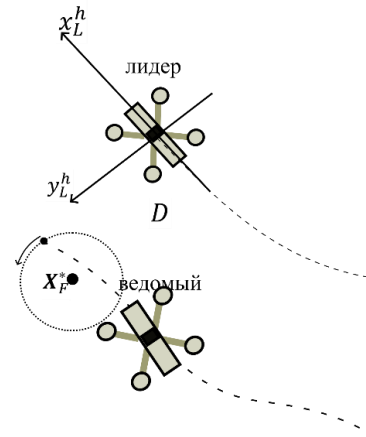


Рис. 2. Движение БПЛА-ведомого в процессе его движения за лидером

Предлагается в процессе движения группы осуществлять дополнительные перемещения ведомого в окрестности его заданного положения в строю относительно лидера. Сопоставляя движения ведомого и измерения дистанции между ведомым и лидером, можно устранить неоднозначность при определении положения ведомого. В качестве такого движения можно задать орбитальное (круговое) движение вокруг заданного положения ведомого с радиусом, который будет гарантировать безопасное движение ведомого.

При этом для автоматического анализа изменения дистанции между лидером и ведомым при известных дополнительных движениях БПЛА-ведомого относительно лидера и оптимального

определения его положения будет использован фильтр частиц. Это позволит за счет моделирования множества вариантов движения ведомого, учесть неопределенность положения БПЛА-ведомого из-за всего одного измерения дальности.

В процессе работы фильтра частиц каждый возможный вариант движения БПЛА-ведомого относительно лидера моделируется движением виртуального объекта – частицы. Модель движения у каждой частицы одинакова и описывается следующим уравнением:

$$\chi_i(k+1) = \chi_i(k) + ((v_F^a(k) + \xi_F(k)) - (v_L^a(k) + \xi_L(k)))h, \quad (4)$$

где $\chi_i = [\chi_{xi}, \chi_{yi}]^T$ – положение i -й частицы в СК $x_L^{sa} y_L^{sa}$; $v_F^a = [v_{xF}^a, v_{yF}^a]^T$, $v_L^a = [v_{xL}^a, v_{yL}^a]^T$ – вектор скорости БПЛА-ведомого и БПЛА-лидера в СК $x_L^{sa} y_L^{sa}$ соответственно; $\xi_F = [\xi_{Fx}, \xi_{Fy}]$, $\xi_L = [\xi_{Lx}, \xi_{Ly}]$ – возможные погрешности измерения скоростей ведомого и лидера, соответственно, представленные как случайные величины с нормальным распределением; h – шаг моделирования. Координата z_F^L не используется, так как доступна для прямого измерения как $z_F^L(k) = z_F(k) - z_L(k)$.

Работа фильтра организована в несколько этапов.

Этап 1. Инициализация. В начале работы фильтра создается N точек – виртуальных объектов, которые описывают различные варианты движения БПЛА-ведомого и содержат информацию об оценках его координат в СК $x_L^{sa} y_L^{sa} z_L^{sa}$. Координаты каждой точки инициализируются следующим образом:

$$\chi_i(0) = \hat{x}_F^L(0) + \Delta_x(1.0 - 2.0rand),$$

где $\hat{x}_F^L(0)$ – исходная оценка положения БПЛА-ведомого в СК $x_L^{sa} y_L^{sa}$; Δ_x – ошибка определения исходного положения БПЛА-ведомого относительно лидера, т.е. возможная область в которой может находиться БПЛА-ведомый; $rand$ – случайное число от 0 до 1.

Каждой частице в соответствие ставится весовой коэффициент, показывающий степень соответствия текущего положения частицы полученным измерениям, которым на этапе инициализации присваиваются одинаковые значения:

$$w_i(0) = \frac{1}{N}, \quad (5)$$

где $w_i(0)$ – исходное значение весового коэффициента для i -й частицы.

Этап 2. Предсказание. На этом этапе происходит изменения состояния частиц согласно модели (4) и полученным данным о скоростях движения лидера и ведомого.

При этом при получении информации о дистанции между БПЛА-ведомым и БПЛА-лидером происходит обновление значений весовых коэффициентов точек по следующему выражению:

$$\Delta_{\chi}^i = \|\chi_i(k) - D(k)\|, \\ \bar{w}_i(k) = \exp\left(-(\Delta_{\chi}^i)^2 / \sigma\right), \quad (6)$$

$$w_i(k) = \frac{\bar{w}_i(k)}{\sum_{k=1}^N \bar{w}_i(k)},$$

где $D(k)$ – измеренное расстояние между БПЛА-лидером и БПЛА-ведомым.

Этап предсказания выполняется заданное количество раз перед этапом прореживания частиц. Многократное выполнение этапа предсказания требуется для того, чтобы накопились рассогласования между положением частиц и измеренной дистанцией, что будет обеспечивать более эффективный отсев частиц, показывающих ошибочные варианты движения БПЛА-ведомого относительно лидера.

Этап 3. Отсеивание частиц. На этом этапе происходит отсеивание частиц, весовые коэффициенты которых слишком малы, и генерация новых частиц вместо отсеянных.

Этот процесс происходит с помощью алгоритма [12], называемого колесо отсева (resampling wheel), и который состоит из следующих этапов.

1. Инициализация.

Вводятся переменные $w_m = \max(w_i)$, $i = (1, N)$ – максимальное значение весового коэффициента из всего набора частиц, и $\beta = 2w_m rand$.

2. Выбирается частица со случайным номером

$$j = R(N),$$

где $R(N)$ – функция генерации случайного целого числа в диапазоне $[1, N]$.

Счетчик итерации алгоритма устанавливается $l = 1$.

3. Отбор частицы.

Этап отбора происходит в цикле, выполняющимся N раз, каждая итерация которого также представляет собой цикл, имеющий вид.

Шаг 1. Если $w_j \geq \beta$, то эта частица проходит отбор и происходит переход на шаг 3, если условие не выполняется, то на шаг 2.

Шаг 2. Если $w_j < \beta$, то величина β изменяется в соответствии с выражением:

$$\beta = \beta - w_j,$$

а индекс j увеличивается на 1. При этом в случае, когда текущий индекс точки равен N , то его увеличение приведет к переходу к точке с индексом 1, то есть последовательность индексов частиц замкнута в кольцо.

Шаг 3. Частица прошла отбор и на ее основе генерируется новая частица, которая сохраняется в новый набор частиц. Указанная генерация происходит по следующей формуле:

$$\bar{\chi}_l = \chi_j + \sigma_{\chi}(1.0 - 2.0rand), \bar{w}_l = w_j \quad (7)$$

где $\sigma_{\chi} = [\sigma_{\chi}^x, \sigma_{\chi}^y]^T$ – заданная область случайного разброса при переходе частицы в новый набор.

Шаг 4. Переменной β присваивается значение:

$$\beta = \beta + 2w_m rand,$$

итерация отсева завершается и происходит переход на шаг 1. Счетчик итераций l увеличивается на 1.

Работа этапа отсева заканчивается, когда $l = N$, то есть через N итераций.

В результате выполнения этапа отсева формируется новый массив из N точек, который будет использоваться далее для работы фильтра на новой итерации (этапы прогнозирования, отсева и оценки). При этом весовые коэффициенты точек

сформированного массива нормируются, в соответствии с выражением (6).

Также видно, что в результате работы этого этапа будут отсеяны частицы с минимальными весовыми коэффициентами, а на основе частиц с большими весовыми коэффициентами будут сгенерированы новые частицы, лежащие в заданной окрестности относительно исходных частиц. Это позволит избежать стягивания всего массива частиц в одну точку и обеспечить оценку положения БПЛА ведомого, анализируя некоторую вероятную область его нахождения.

Этап 4. Формирование результата. На этом этапе на основе текущего набора точек формируется оценка положения БПЛА-ведомого в СК $x_L^{sa}y_L^{sa}$. Указанная оценка формируется по выражению:

$$\hat{x}_F^{sa} = \sum_{i=1}^N \chi_i w_i. \quad (8)$$

Полученная оценка далее используется для формирования сигналов управления БПЛА-ведомым.

Следует отметить, что оценка (8) может быть сформирована на любом этапе работы фильтра, так как текущий массив частиц и их весовых коэффициентов всегда доступен. Это позволяет в определенных пределах распараллелить выполнение расчетов при наличии нескольких вычислительных ядер в процессоре бортового контроллера.

Далее рассмотрим синтез системы управления БПЛА-ведомого.

Синтез системы управления для БПЛА-ведомого

В процессе синтеза системы управления БПЛА-ведомого будем считать, что он уже имеет систему управления углами ориентации, которая может быть реализована с помощью типового полетного контроллера. При этом на вход системы управления (СУ) будет подаваться входной сигнал, задающий желаемое положение ведомого в СК $x_L^{sa}y_L^{sa}z_L^{sa}$. Однако желаемое положение X_F^* БПЛА-ведомого удобно задавать в СК $x_L^h y_L^h z_L^h$, что позволит обеспечить постоянство строя БПЛА-ведомых, независимо от маневров лидера. Поэтому пересчет желаемого положения ведомого в СК $x_L^{sa}y_L^{sa}z_L^{sa}$ будет происходить по формуле:

$$X_F^* = \begin{bmatrix} x_F^{*s} \\ y_F^{*s} \\ z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi_L & -\sin\psi_L & 0 \\ \sin\psi_L & \cos\psi_L & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_F^* \\ y_F^* \\ z_L \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где ψ_L – угол курса БПЛА-лидера, z_L – высота БПЛА-лидера; x_F^*, y_F^* – заданное положение БПЛА-ведомого относительно лидера в СК $x_L^h y_L^h z_L^h$, которое имеет вид:

$$\begin{aligned} x_F^* &= x_F^{f*} + x_F^{o*} = x_F^{f*} + R_o \cos(\omega_o t), \\ y_F^* &= y_F^{f*} + y_F^{o*} = y_F^{f*} + R_o \sin(\omega_o t), \end{aligned}$$

где x_F^{f*}, y_F^{f*} – желаемое положение БПЛА-ведомого в строю относительно лидера; x_F^{o*}, y_F^{o*} – программный сигнал, задающий орбитальное движение БПЛА-ведомого относительно его желаемого места в

строю; R_o, ω_o – параметры орбитального движения БПЛА-лидера.

Выражение (9) говорит о том, что БПЛА-ведомый должен поддерживать такую же высоту, как и БПЛА-лидер, сохраняя свое положение относительно него в горизонтальной плоскости. При этом дополнительная компонента x_F^{o*}, y_F^{o*} вводится для непрерывного изменения положения БПЛА-ведомого относительно лидера, для устранения неопределенности в определении положения на основе одного измерения дальности от ведомого до лидера.

Для синтеза СУ БПЛА-ведомого будем использовать модель его движения (2)-(3) в АСК, которая для линейного движения будет записываться в виде:

$$\begin{aligned} \dot{v} &= R_v v + G + D + m_q^{-1} F, \\ \dot{X} &= J_v v. \end{aligned} \quad (10)$$

Систему (10) запишем в виде одного дифференциального уравнения второго порядка. Для этого продифференцируем второе уравнение и вместо $\dot{v}$ подставим первое уравнение. В результате получим:

$$\ddot{X} = \dot{J}_v v + J_v \dot{v} = \dot{J}_v v + J_v (R_v v + G + D + m_q^{-1} F). \quad (11)$$

Желаемые динамические свойства БПЛА-ведомого при движении по линейным координатам в АСК зададим с помощью линейного дифференциального уравнения вида:

$$\ddot{X} + \Lambda \dot{X} + \delta X = \Lambda \dot{X}^* + \delta X^*, \quad (12)$$

где $\Lambda \in R^{3 \times 3}, \delta \in R^{3 \times 3}$ – диагональные матрицы положительных коэффициентов; $X^* = [x^*, y^*, z^*]^T$ – желаемые значения координат БПЛА-ведомого в АСК.

Следует отметить, что характер желаемых переходных процессов будет определяться выбором матриц Λ и δ . Чем выше будут коэффициенты в матрице Λ , тем быстрее будет протекать переходной процесс, при этом для того, чтобы обеспечить отсутствие перерегулирования необходимо задать следующее соотношение между коэффициентами в матрицах Λ и δ :

$$\delta_i < \Lambda_i^2 / 4. \quad (13)$$

Выразим вторую производную X из (12):

$$\ddot{X} = \Lambda \dot{E}_x + \delta E_x, \quad (14)$$

где $E_x = X^* - X = [e_x, e_y, e_z]^T$ – вектор ошибок по положению БПЛА-ведомого в АСК. С учетом того, что желаемое положение БПЛА-ведомого задается относительно БПЛА-лидера в СК $x_L^{sa}y_L^{sa}z_L^{sa}$, то величины E_x и $\dot{E}_x$ могут быть записаны как:

$$\begin{aligned} E_x &= [x_F^{*s} - \hat{x}_F^{sa}, y_F^{*s} - \hat{y}_F^{sa}, z_L - z_F]^T, \\ \dot{E}_x &= [v_{x_F}^a - v_{x_L}^a, v_{y_F}^a - v_{y_L}^a, v_{z_F}^a - v_{z_L}^a]^T. \end{aligned}$$

Приравняв правые части уравнений (11) и (14) и выразив из получившегося уравнения вектор F :

$$\mathbf{F}^* = m_q \mathbf{J}_v^{-1} (\mathbf{A} \dot{\mathbf{E}}_x + \delta \mathbf{E}_x - \dot{\mathbf{J}}_v \mathbf{v}) - m_q (\mathbf{R}_v \mathbf{v} + \mathbf{D} + \mathbf{G}) \quad (15)$$

где $\dot{\mathbf{J}}_v$ вычисляется по выражению:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{J}}_v &= \frac{\partial \mathbf{J}_v}{\partial \varphi} \dot{\varphi} + \frac{\partial \mathbf{J}_v}{\partial \theta} \dot{\theta} + \frac{\partial \mathbf{J}_v}{\partial \psi} \dot{\psi} \\ &= \frac{\partial \mathbf{J}_v}{\partial \varphi} \mathbf{J}_\omega(1, \cdot) \omega + \frac{\partial \mathbf{J}_v}{\partial \theta} \mathbf{J}_\omega(2, \cdot) \omega \\ &\quad + \frac{\partial \mathbf{J}_v}{\partial \psi} \mathbf{J}_\omega(3, \cdot) \omega, \\ \frac{\partial \mathbf{J}_v}{\partial \varphi} &= \begin{bmatrix} 0 & s_\varphi s_\psi + c_\varphi c_\psi s_\theta & c_\varphi s_\psi - c_\psi s_\varphi s_\theta \\ 0 & c_\varphi s_\psi s_\theta - c_\psi s_\varphi & -c_\varphi c_\psi - s_\varphi s_\psi s_\theta \\ 0 & c_\varphi c_\theta & -c_\theta s_\varphi \end{bmatrix}, \\ \frac{\partial \mathbf{J}_v}{\partial \theta} &= \begin{bmatrix} -c_\psi s_\varphi & c_\psi c_\varphi s_\theta & c_\varphi c_\psi c_\theta \\ -s_\psi s_\theta & c_\theta s_\varphi s_\psi & c_\varphi c_\theta s_\psi \\ -c_\theta & -s_\varphi s_\theta & -c_\varphi s_\theta \end{bmatrix}, \\ \frac{\partial \mathbf{J}_v}{\partial \psi} &= \begin{bmatrix} c_\theta s_\psi & -c_\varphi c_\psi - s_\varphi s_\psi s_\theta & c_\psi s_\varphi - c_\varphi s_\psi s_\theta \\ c_\psi c_\theta & c_\psi s_\varphi s_\theta - c_\varphi s_\psi & s_\varphi s_\psi + c_\varphi c_\psi s_\theta \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

где $\mathbf{J}_\omega(i, \cdot)$ – i -я строка матрицы $\mathbf{J}_\omega$.

При этом следует учесть, что величины $\mathbf{E}_x$ и $\dot{\mathbf{E}}_x$ не учитывают собственное движение БПЛА-лидера, что приведет к появлению больших ошибок слежения. Поэтому надо ввести дополнительный сигнал управления, который обеспечивал бы БПЛА-ведомому движение со скоростью БПЛА-лидера. Для этого можно применить следующий подход.

Можно показать, что использование закона управления (15), обеспечивающее движение БПЛА-ведомого в соответствии с желаемым уравнением (13), (14), для каждой линейной степени свободы задает на фазовой плоскости движение, которое описывается параболой вида:

$$\left(\dot{e} - \frac{\lambda}{2} e \right)^2 = 0, \quad (16)$$

где e – ошибка по соответствующей координате; λ – соответствующий коэффициент матрицы Λ .

Это означает, что если в качестве ошибки по отдельной координате задать некоторую постоянную величину, то система управления (15) обеспечит движение БПЛА-ведомого по этой координате с такой скоростью, чтобы выполнялось соотношение (16). Поэтому для учета собственной скорости движения БПЛА-лидера вместо вектора ошибок $\mathbf{E}_x$ в законе управления (15) можно использовать следующий сигнал:

$$\bar{\mathbf{E}}_x = \mathbf{E}_x + \begin{bmatrix} 2/\lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & 2/\lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{xL}^a \\ v_{yL}^a \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Закон управления (15) формирует желаемый вектор $\mathbf{F}^*$ сил в ССК, который необходимо прикладывать к БПЛА-ведомому, чтобы обеспечить процесс поддержания заданного положения относительно лидера с желаемыми динамическими свойствами. Однако движительный комплекс БПЛА-ведомого не может создавать напрямую такой вектор тяги, поэтому чтобы обеспечить реализацию рассчитанного вектора тяги. Поэтому необходимо пересчитать его относительно полусвязанной системы координат (ПСК), направление оси z которой совпадает с вертикальной осью АСК, а направление ее оси x совпадает с направлением оси

х ССК. Вектор желаемых сил в ПСК будет рассчитываться по выражению:

$$\mathbf{F}_s^* = \mathbf{J}_\psi^{-1} \mathbf{J}_v \mathbf{F}^*, \quad (18)$$

где $\mathbf{F}_s^* = [F_{sx}^*, F_{sy}^*, F_{sz}^*]^T$ – вектор желаемых сил в ПСК;

$\mathbf{J}_\psi = \begin{bmatrix} c_\psi & -s_\psi & 0 \\ s_\psi & c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ – матрица поворота вокруг оси z АСК.

Пересчет вектора $\mathbf{F}^*$ в желаемые углы крена и тангажа и желаемую тягу по оси z ССК будет вычисляться по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \varphi_F^* &= -\text{atan}\left(\frac{F_{sy}^*}{F_{sz}^*}\right), \theta_F^* = \text{atan}\left(\frac{F_{sx}^*}{F_{sz}^*}\right), \\ F_z^* &= \frac{F_{sz}^*}{(\cos(\varphi_F^*) \cos(\theta_F^*))^2}. \end{aligned} \quad (19)$$

где φ_F^*, θ_F^* – желаемые углы крена, тангажа БПЛА-ведомого.

Желаемое значение угла курса ψ_F^* задается равным углу курса лидера, чтобы обеспечить их согласованное движение.

Таким образом, закон управления (15) позволяет обеспечить заданное положение БПЛА-ведомого относительно лидера при его произвольном пространственном движении.

Результаты математического моделирования

Для исследования предложенного метода синтеза системы группового управления БПЛА было проведено математическое моделирование в среде MATLAB/Simulink.

Для этого задавалось движение ведомого со скоростью 9 м/с, проекции которой на оси АСК менялись по следующим законам:

$$\begin{aligned} v_x &= 9.0 \cos(\sin(0.02t) + 0.7), \\ v_y &= 9.0 \sin(\sin(0.02t) + 0.7). \end{aligned}$$

Ошибка измерения дистанции моделировалась добавлением случайной величины, амплитуда которой равнялась 0.1м. Ошибки измерения линейных скоростей по осям x и y ССК, элементы векторов ξ_F и ξ_L , задавалась случайными величинами с амплитудой 0.5 м/с.

Реализация фильтра частиц содержала 1000 точек, а параметр σ_x имел значения $\sigma_x = [0.5, 0.5]$ м.

В процессе моделирования движения БПЛА-ведомого его желаемое положение относительно лидера в СК $x_L^h y_L^h z_L^h$ задавалось вектором $[-20, 20, 0]$ м, а его орбитальное движение вокруг этого положения задавалось выражениями:

$$x_F^{*o} = 4.0 \cos(0.2t), y_F^{*o} = 4.0 \sin(0.2t).$$

Параметры СУ ведомого имели следующие значения: $\Lambda = [2.0, 2.0, 4]$, $\delta = [0.5, 0.5, 4]$.

Параметры БПЛА-ведомого имели значения:

$$m_q = 2.5 \text{ кг}, I = \text{diag}([0.2, 0.2, 0.4]) \text{ кгм}^2, d_x = 0.05, d_y = 0.05, d_z = 0.05.$$

Результаты моделирования показаны на рисунках 3-7. На рисунке 3 показана ошибка восстановления координат БПЛА-ведомого в СК $x_L^{sa} y_L^{sa} z_L^{sa}$ (красная кривая соответствует ошибке $e_{x_F}^{sa}$ по координате x , синяя – ошибке $e_{y_F}^{sa}$ по координате y).

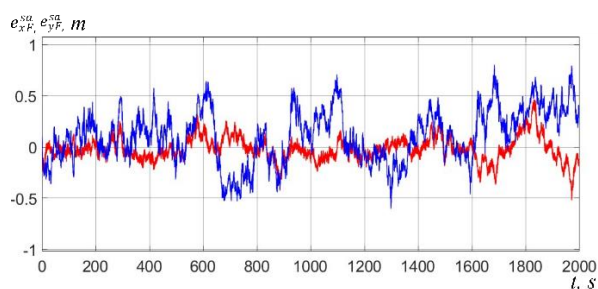
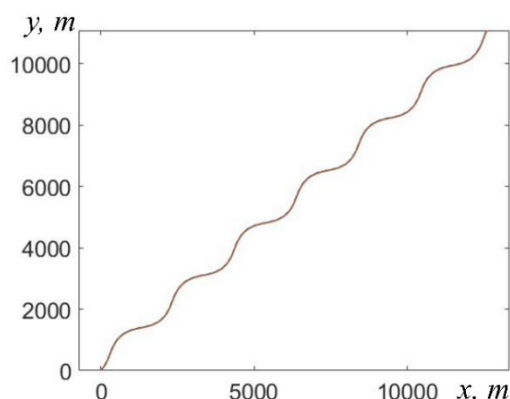


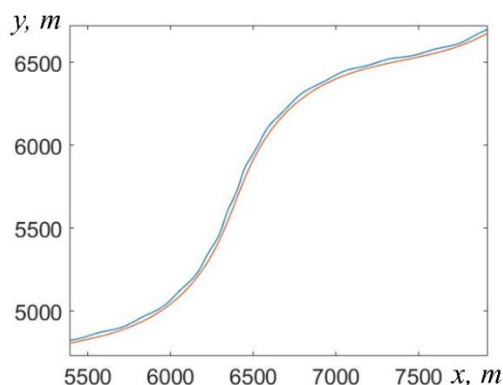
Рис. 3. Ошибка восстановления координат БПЛА-ведомого

Как видно из представленного рисунка, ошибка определения координат практически не превышает 0.5 м, и не нарастает в процессе движения. Это говорит об устойчивости работы навигационного алгоритма и успешном устранении с его помощью неопределенностей при использовании только одного измерения дистанции до лидера. При этом указанная ошибка многократно меньше заданной дистанции до лидера, что не приведет к столкновению между БПЛА.

На рисунке 4 показан участок траектории движения БПЛА-лидера и БПЛА-ведомого (красная линия соответствует движению лидера, синяя – движению ведомого). При этом на рисунке 4а показана полная траектория движения в АСК, а на рисунке 4б – увеличенная ее часть.



а)



б)

Рис. 4. Траектории движения лидера и ведомого.

Как видно из представленных рисунков предложенный метод обеспечивает БПЛА-ведомому достаточно точное движение за лидером. При этом на БПЛА-ведомый заранее не имеет информации о

заданной траектории движения лидера, а также информации о координатах в АСК. Информация для этого движения формируется на борту этих БПЛА.

На рисунке 5 показана траектория движения БПЛА-ведомого в связанной с лидером системе координат x_L^h, y_L^h, z_L^h . На этом рисунке красным кружком

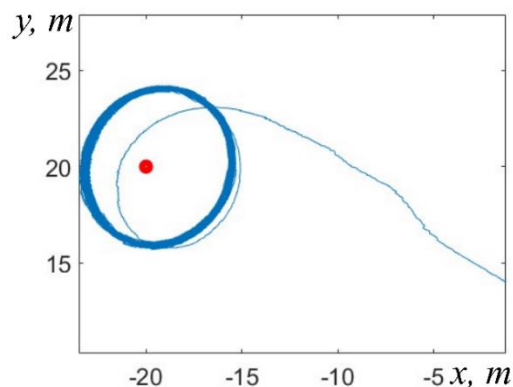


Рис. 5. Орбитальное движение БПЛА вокруг точки X_F^* в СК x_L^h, y_L^h, z_L^h

обозначено желаемое положение ведомого относительно лидера (точка X_F^* на рисунке 2).

Как видно из представленного рисунка ведомый совершает круговые движения вокруг желаемого положения относительно лидера. Ошибки слежения за перемещением точки, задающей положение ведомого, показаны на рисунке 6 (красная линия – ошибка ε_{x_F} слежения по координате x, а синяя – ошибка ε_{y_F} по координате y).

Как видно из представленного рисунка ошибки слежения не превышают 1.0 м, что достаточно для безопасного следования за лидером.

На рисунке 7 показано изменение углов ориентации БПЛА-ведомого в процессе слежения за лидером (зеленая кривая угол крена φ_F , синяя кривая – тангаж θ_F , красная кривая – курса ψ_F).

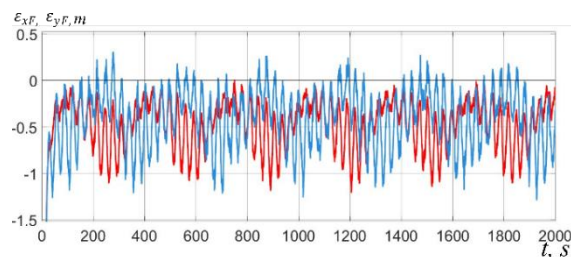


Рис. 6. Ошибки слежения системы управления БПЛА-ведомого

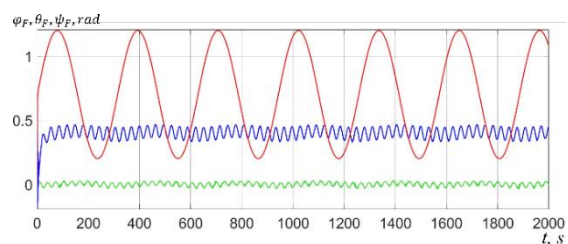


Рис. 7. Изменение углов ориентации БПЛА-ведомого

Как видно из рисунка, в процессе движения за лидером дополнительные орбитальные движения вокруг точки X_F^* приводят к дополнительным

изменениям углов крена и тангажа. Однако амплитуды этих изменений не велики (около 1° по крену и 2° по тангажу) и не вызывают дополнительной нагрузки на движители БПЛА.

Таким образом, результаты моделирования подтвердили высокую эффективность предложенной системы группового управления БПЛА.

Заключение

В работе предложен метод синтеза системы группового управления БПЛА, движущихся в режиме «лидер-ведомые», когда в группе выделяется БПЛА-лидер, который, двигаясь в автономном режиме или под управлением оператора, задает движение всей группы. При этом остальные БПЛА назначаются ведомыми и движутся за лидером в определенной строю, сохраняя свое заданное положение относительно лидера. В процессе указанного движения предполагается, что информация о текущих координатах БПЛА группы недоступна, а на лидере стоит радиомаяк стандарта UBW, с помощью которого БПЛА-ведомые могут определять дистанцию до лидера. Также по каналу связи UBW лидер может передавать ведомым информацию о

параметрах своего движения, измеренными бортовыми датчиками.

Для реализации системы группового управления в работе предлагается метод локальной навигации, основанный на фильтре частиц, который позволяет оценить положение ведомого относительно лидера. При этом для устранения неопределенности, вызванной измерением только одной дистанции до лидера, было предложено формировать ведомому дополнительные программные сигналы, обеспечивающие его орбитальное движение вокруг желаемого положения. Для точной отработки указанного положения была синтезирована нелинейная система управления, которая обеспечивает учет динамических особенностей БПЛА, и формирование величин программных сигналов углов ориентации, которые могут быть поданы на вход типовых полетных контроллеров.

Эти же системы могут быть применены для взлета и посадки на движущееся судно в море и на внутренних водных путях, например, как показано в [13].

Результаты математического моделирования полностью подтвердили эффективность предложенного подхода к построению систем группового управления БПЛА.

Литература

- Bestaoui Sebbane, Y. Smart Autonomous Aircraft: Flight Control and Planning for UAV (1st ed.). CRC Press, 2015 440 p. <https://doi.org/10.1201/b19350>
- Muzirafuti A., Randazzo G., Lanza S. UAV Application for Coastal Area Monitoring: A Case Study of Sant'Alessio Siculo, Sicily. Proc. of 2022 IEEE International Workshop on Metrology for the Sea; Learning to Measure Sea Health Parameters (MetroSea). Milazzo, Italy, 2022, pp. 143-147. <https://doi.org/10.1109/MetroSea55331.2022.9950841>.
- Губанков А.С., Горностаев И.В. Разработка метода формирования программной скорости движения группы БПЛА. Морские интеллектуальные технологии, 2024, № 4, часть 4, С. 33-41. <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.077>
- Бабич О. А., Маклаков Д. Ю., Рязанцев Л. Б., Силкин А. А. Приоритетные направления совершенствования группового применения беспилотных летательных аппаратов при ведении боевых действий. Военная мысль, 2024, № 11, С. 21-29. EDN AIVXHD.
- Yukhimets D., Filaretov V. The AUV-Follower Control System Based on the Prediction of the AUV-Leader Movement Using Data from the Onboard Video Camera. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, Vol. 10, №. 8, Paper Number 1141, P. 1-24. <https://doi.org/10.3390/jmse10081141>
- Liu B., Yang S., Li Q., Tu Y. Safe Formation Control For Micro-UAV Using Control Barrier Functions. 2024 China Automation Congress (CAC). Qingdao, China, 2024, pp. 3933-3938. <https://doi.org/10.1109/CAC63892.2024.10864752>.
- Zhang Y., Hui Y., Chi R. Adjacent Dynamic Linearization based Data-Driven Iterative Learning Control for Vehicle Formation. 2025 IEEE 14th Data Driven Control and Learning Systems (DDCLS). Wuxi, China, 2025, pp. 1460-1464. <https://doi.org/10.1109/DDCLS66240.2025.11065807>
- Pal A., Naskar A. K. Cooperative Control with Higher Order Consensus for Geometric Configuration of Multiple UAVs Flying in Formation. 2021 International Symposium of Asian Control Association on Intelligent Robotics and Industrial Automation (IRIA). Goa, India, 2021, pp. 187-191. <https://doi.org/10.1109/IRIA53009.2021.9588729>.
- Zhang L., Li Y.-F., Zhang Y. SIDF: A Desensitization Framework for Sensitive Information in Chinese Medical Report Images. 27th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD). Tianjin, China, 2024, pp. 1639-1644. <https://doi.org/10.1109/CSCWD61410.2024.10580575>.
- Regula G., Lantos B. Formation control of a large group of UAVs with safe path planning and obstacle avoidance. 2014 European Control Conference (ECC). Strasbourg, France, 2014, pp. 1522-1529, <https://doi.org/10.1109/ECC.2014.6862411>.
- Beard R., McLain T. Small Unmanned Aircraft Theory and Practice. Princeton University Press, 2012, 389 p.
- Douc R., Capp O., Moulines E. (2005). Comparison of resampling schemes for particle filtering. In Proceedings of the IEEE 4th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, 2005, pp.64–69.
- Горин В.А., Губанков А.С., Юхимец Д.А. Подход к построению информационно-управляющей системы для посадки беспилотного воздушного судна. Морские интеллектуальные технологии, 2024, № 4, часть 4, С. 51-60. <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.079>

References

- Bestaoui Sebbane, Y. Smart Autonomous Aircraft: Flight Control and Planning for UAV (1st ed.). CRC Press, 2015 440 p. <https://doi.org/10.1201/b19350>

2. Muzirafuti A., Randazzo G., Lanza S. UAV Application for Coastal Area Monitoring: A Case Study of Sant'Alessio Siculo, Sicily. Proc. of 2022 IEEE International Workshop on Metrology for the Sea; Learning to Measure Sea Health Parameters (MetroSea). Milazzo, Italy, 2022, pp. 143-147. <https://doi.org/10.1109/MetroSea55331.2022.9950841>.
3. Gubankov A.S., Gornostaev I.V. Method of generating a reference movement speed of a group of UAVs. Marine intellectual technologies, 2024, № 4, Part 4, pp. 33-41. <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.077>
4. Babich O. A., Maklakov D. Yu., Ryazantsev L. B., Silkin A. A. Prioritetnie napravleniia sovershenstvovaniia gruppovogo primeneniia bespilotnykh letatelnykh apparatov pri vedenii boevykh deistviy [Priority areas for improving the group use of unmanned aerial vehicles in combat operations]. Voennaia mysl', 2024, № 11, pp. 21-29. EDN AIVXHD.
5. Yukhimets D., Filaretov V. The AUV-Follower Control System Based on the Prediction of the AUV-Leader Movement Using Data from the Onboard Video Camera. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, Vol. 10, № 8, Paper Number 1141, P. 1-24. <https://doi.org/10.3390/jmse10081141>
6. Liu B., Yang S., Li Q., Tu Y. Safe Formation Control For Micro-UAV Using Control Barrier Functions. 2024 China Automation Congress (CAC). Qingdao, China, 2024, pp. 3933-3938. <https://doi.org/10.1109/CAC63892.2024.10864752>.
7. Zhang Y., Hui Y., Chi R. Adjacent Dynamic Linearization based Data-Driven Iterative Learning Control for Vehicle Formation. 2025 IEEE 14th Data Driven Control and Learning Systems (DDCLS). Wuxi, China, 2025, pp. 1460-1464. <https://doi.org/10.1109/DDCLS66240.2025.11065807>
8. Pal A., Naskar A. K. Cooperative Control with Higher Order Consensus for Geometric Configuration of Multiple UAVs Flying in Formation. 2021 International Symposium of Asian Control Association on Intelligent Robotics and Industrial Automation (IRIA). Goa, India, 2021, pp. 187-191. <https://doi.org/10.1109/IRIA53009.2021.9588729>.
9. Zhang L., Li Y.-F., Zhang Y. SIDF: A Desensitization Framework for Sensitive Information in Chinese Medical Report Images. 27th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD). Tianjin, China, 2024, pp. 1639-1644. <https://doi.org/10.1109/CSCWD61410.2024.10580575>.
10. Regula G., Lantos B. Formation control of a large group of UAVs with safe path planning and obstacle avoidance. 2014 European Control Conference (ECC). Strasbourg, France, 2014, pp. 1522-1529, <https://doi.org/10.1109/ECC.2014.6862411>.
11. Beard R., McLain T. Small Unmanned Aircraft Theory and Practice. Princeton University Press, 2012, 389 p.
12. Douc R., Capp O., Moulines E. (2005). Comparison of resampling schemes for particle filtering. In Proceedings of the IEEE 4th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, 2005, pp.64–69.
13. Gorin V.A., Gubankov A.S., Yukhimets D.A. Approach to development of an information-control system for landing an unmanned aerial vehicle, Marine intellectual technologies. 2024, № 4, Part 4, pp. 51-60. <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.079>

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

Юхимец Дмитрий Александрович, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ИАПУ ДВО РАН, 690041, г.Владивосток, ул. Радио, 5, e-mail: undim@iacp.dvo.ru

Dmitry A. Yukhimets, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading researcher IACP FEB RAS, 5, Radio str., Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: undim@iacp.dvo.ru

Губанков Антон Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, заведующий лабораторией морской беспилотной авиации и морских авиационных систем, МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50а, e-mail: gubankov@iacp.dvo.ru

Anton S. Gubankov, Ph.D (Eng.), Associate Professor, senior scientist Institute of Automation and control processes FEB RAS, Head of laboratory of marine unmanned aviation and marine aviation systems, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, 50a, Verhneportovaya str., Vladivostok, 690003, Russian Federation, e-mail: gubankov@iacp.dvo.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.10.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.11.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 20.11.2025.

Научная статья

УДК 535.15

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.022>

ИК-диагностика лазерных кристаллов, используемых в ядерных реакторах ледоколов и в морской навигации

Тимохин В. М.¹ t.v.m@inbox.ru¹Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. Для контроля паросодержания и для обнаружения протечки в контуре теплоносителя ядерного энергетического реактора, где используется тяжёлая вода, используется лазерный фотометрический метод, но в результате Н/Д-обмена в кристаллах возможно образование молекул полутяжёлой воды HDO, что в результате уменьшает прозрачность и снижает мощность излучения лазера. В работе исследовались ИК-спектры пропускания и поглощения гексагональных кристаллов иодата лития, широко используемых как в ядерных реакторах, так и в лазерных маяках. Диапазон прозрачности кристалла иодата лития достаточно широкий (от 300 нм до 5000 нм), что наиболее благоприятно к восприятию для глаз оператора и для оптимального функционирования лазерных систем. По ИК-спектрам определена энергия активации и волновые числа колебательных центров, обусловленных колебаниями групп H_3O^+ , OH^- , H_2O и HDO. Показано, что полоса (1450...1650) cm^{-1} является суперпозицией двух полос поглощения, центрированных при ~1550 и ~1600 cm^{-1} . Экспериментально установлено, что соотношение коэффициентов поглощения указанных полос составило ~1:1 (75:74 cm^{-1}) для кристаллов, выращенных в H_2O , и ~2:1 (161:82 cm^{-1}) для кристаллов, выращенных в D_2O . Это позволяет сделать вывод о том, что полосы 1550 cm^{-1} и 1600 cm^{-1} связаны с колебаниями молекул H_2O и HDO. Проведённые исследования доказали, что ИК-спектры могут успешно применяться для диагностики качества лазерных кристаллов и присутствия в них молекул тяжелой и полутяжёлой воды.

Ключевые слова: ИК-спектры, лазерные кристаллы, тяжёлая вода, диагностика, лазерные маяки.

Для цитирования: Тимохин В.М. ИК-диагностика лазерных кристаллов, используемых в ядерных реакторах ледоколов и в морской навигации, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 214—220. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.022.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.022>

IR-diagnostics of laser crystals used in nuclear reactors of icebreakers and in marine navigation

Viktor M. Timokhin¹ t.v.m@inbox.ru¹Admiral Ushakov State Maritime University, 93, Lenin avenue, Novorossiysk, 353918, Russia

Abstract. To monitor vapor content and to detect leaks in the coolant circuit of a nuclear power reactor that uses heavy water, a laser photometric method is used, but as a result of H/D exchange in crystals, semi-heavy water molecules HDO can be formed, which as a result reduces transparency and reduces laser radiation power. The work examined the IR transmission and absorption spectra of hexagonal lithium iodate crystals, widely used both in nuclear reactors and in laser beacons. The transparency range of the lithium iodate crystal is quite wide (from 300 nm to 5000 nm), which is most favorable for the perception of the operator's eyes and for the optimal functioning of laser systems. The activation energy and wave numbers of vibrational centers caused by vibrations of the H_3O^+ , OH^- , H_2O and HDO groups were determined from the IR spectra. It is shown that the band (1450...1650) cm^{-1} is a superposition of two absorption bands centered at ~1550 and ~1600 cm^{-1} . It was experimentally established that the ratio of the absorption coefficients of these bands was ~1:1 (75:74 cm^{-1}) for crystals grown in H_2O , and ~2:1 (161:82 cm^{-1}) for crystals grown in D_2O . This allows us to conclude that the bands at 1550 cm^{-1} and 1600 cm^{-1} are associated with vibrations of H_2O and HDO molecules. The conducted studies have proven that IR spectra can be successfully used to diagnose the quality of laser crystals and the presence of heavy and semi-heavy water molecules in them.

Key words: IR spectra, laser crystals, heavy water, diagnostics, laser beacons.

For citation: Viktor M. Timokhin, IR-diagnostics of laser crystals used in nuclear reactors of icebreakers and in marine navigation, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 214—220. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.022.

Введение

Использование лазерных кристаллов в ядерных отсеках атомных ледоколов и для целей навигации позволяет успешно осуществлять проводку судов в сложных погодных условиях. В ядерных реакторах тяжёлая вода, используется в качестве замедлителя нейтронов. Для контроля паросодержания в водном теплоносителе ядерных реакторов и в технических помещениях используется лазерный

фотометрический метод [1], в частности в реакторе ВВР-640, где требуется около 600 тонн D_2O . Лазерная система для обнаружения протечки в контуре теплоносителя ядерного энергетического реактора содержит два лазерных генератора, измеритель лазерного излучения и другое оборудование.

Такие особенности лазерного излучения, как значительное отличие лазерного луча от других огней и высокая видимость луча на больших

расстояниях создают предпосылки для развития лазерных навигационных средств. Поэтому особенно важно учитывать сложные погодные условия работы лазерных кристаллов при высокой влажности, особенно в условиях северного морского пути. Кроме того, в процессе работы ядерных реакторов атомных ледоколов возможна диффузия молекул тяжёлой воды или дейтерия в структуру кристаллических материалов датчиков, определяющих состояние теплоносителя, в результате чего изменяются их оптические и электроизоляционные параметры. В ядерных реакторах используются сцинтилляционные счётчики на основе активированных кристаллов иодата LiIO_3 и йодида лития LiI .

В результате H/D-обмена в кристаллах возможно образование молекул полутяжёлой воды HDO , что служит причиной уменьшения прозрачности и снижения мощности пропускаемого излучения.

В настоящее время среди лазерных навигационных систем наибольшее применение получили лазерные створы, предназначенные для указания направления и границ движения судна. Применяемый для этого кристалл $\alpha\text{-LiIO}_3$ является одним из нелинейно-оптических кристаллов с широким диапазоном прозрачности от 300 нм до 5000 нм. Показатели преломления имеют следующие значения $n_o=1,8571$ и $n_e=1,7165$ при длине волны $\lambda=1064$ нм.

Такой диапазон длин волн излучения лазера, удалённые от ультрафиолетового, наиболее благоприятен к восприятию для глаз оператора движущегося объекта в области лазерного створа, что особенно важно для оптимального функционирования систем оптической и лазерной навигации, ориентирования и проводки судов и других транспортных средств. В настоящее время лазерные створные маяки типа «Анемон», «Глиссада-М» и «СКАЛС» применяются в портах Туапсе, на Ладоге и в Калининградском морском канале. В этих устройствах используется полупроводниковый лазерный модуль ЛМ-650-20, в котором применяется излучение с длиной волны 650 нм при мощности 20 Вт, что позволяет достигать дальности действия до 5 км. Для аналогичных целей применяются также лазеры ЛТИ-701, ЛТИ-702 на основе двух сканирующих лазерных маяков, в которых происходит внутрирезонаторное преобразование во вторую гармонику излучения лазера при работе в режиме акустооптической модуляции добротности резонатора с длиной волны 1060 нм. В качестве преобразователя частоты используется кристалл иодата лития LiIO_3 , что доказывает необходимость исследования колебательных центров в таких кристаллах для их качественной работы.

В работах [2-4] исследована протонно-ионная проводимость и определена вероятность туннелирования протонов при образовании колебательных центров.

1. Методика и результаты эксперимента

1.1. Материалы и оборудование

В данной работе исследовались кристаллы иодата лития гексагональной сингонии, точечной группы C_6 (рис.1), которые выращивались в H_2O и D_2O при температуре 75°C на установке, показанной на рисунке 2. Кристаллы растут как гексагональные бипирамиды. Параметры выращенных кристаллов хорошо коррелируют с результатами работы [5]. Процесс выращивания кристаллов иодата лития длился в течение 6 месяцев, затем разрезались на станке алмазным диском с охлаждением глицерином. Гексагональные образцы толщиной (5...10) мм вырезались в виде прямоугольников вдоль и перпендикулярно кристаллографической оси Z . Для исследований выбраны около 10 образцов, которые перепроверялись несколько раз. Образцы хранились в эксикаторе при комнатной температуре.



Рис. 1. Монокристалл иодата лития

Далее образцы шлифовались вручную на шлифовальных стеклах с использованием суспензии шлифовальных порошков с глицерином, после чего полировались до прозрачного состояния пастой Гойя. Направление вдоль кристалла является кристаллографической осью Z (C_6) или осью $[0001]$, в то время как грань, параллельная оси Z , соответствует $(10\bar{1}0)$, а Z - срез соответствует плоскости $(000\bar{1})$.

Для осуществления диагностики молекул тяжёлой воды образцы помещались в камеру ИК-спектрометра. Анализ ИК-спектров дал возможность выявить вклад протонов в колебательные центры и спектральные полосы, соответствующие полутяжёлой воде. По высоте и положению этих спектральных линий были определены энергия активации, длина волны и волновое число.

Для увеличения прозрачности кристаллов в раствор добавлялась иодоватая кислота HIO_3 , являющаяся донором протонов, с концентрацией до 10%, что создаёт кислотность $pH = 1,5$.



Рис.2. Установка для выращивания монокристаллов α -LiIО₃ (НПО «Полюс», г. Москва)

1.2. ИК-спектры пропускания и поглощения

Для получения спектров пропускания (рис.3) использовался спектрофотометр UV-ViS-NiR Cary 5000. Для прямых разрешённых переходов вероятность перехода не зависит от энергии фотона. С учётом этого коэффициент пропускания для прямых разрешённых переходов выражается формулой

$$T = A(h\nu - E_g), \quad h\nu > E_g \quad (1)$$

Здесь E_g - ширина запрещённой зоны, A - коэффициент, зависящий от концентрации и эффективных масс электрона и дырки. Как следует из рисунка 3 величина T линейно зависит от энергии $h\nu$ в некотором интервале. Продолжение этой прямой до пересечения с осью абсцисс позволяет определить ширину запрещённой зоны E_g . Из (1) следует, что для прямых переходов не должно иметь место поглощение квантов с энергией, меньшей ширины запрещённой зоны. В силу этого край собственного поглощения со стороны длинных волн (или малых энергий) должен быть очень резким. Действительно, как видно из рисунка 3 у чистых монокристаллов иодата лития наблюдается крутой рост поглощения. Расчёт ширины запрещённой зоны монокристаллов α -LiIО₃ производился по краю собственного поглощения методом линейной аппроксимации оптических спектров пропускания.

В результате получена величина запрещённой зоны кристаллов иодата лития (4,378 эВ параллельно оси Z (C₆) (оси [0001]) и 4,461 эВ вдоль оси X) [4], что совпадает с выводами [5]. Такое высокое значение запрещённой зоны свидетельствует о том, что электроны не могут участвовать в электрической проводимости изученных кристаллов. Результаты указаны в таблице 1 согласно проведённой линейной регрессии алгоритма расчётов для кристаллов LiIО₃ (H₂O) и LiIО₃ (D₂O). Ширина запрещённой зоны ΔE определяется по отношению параметров аппроксимации A и B для различных срезов ряда кристаллов иодата лития $\Delta E = A/B$. Погрешность (Error) при определении параметров аппроксимации A и B составляет величину (1,15...1,91)%.

Таблица 1

Расчёт ширины запрещённой зоны для кристаллов иодата лития

Образец		LiIО ₃ Z (H ₂ O)	LiIО ₃ Z (D ₂ O)	LiIО ₃ X (H ₂ O)	LiIО ₃ (3Z)	LiIО ₃ (Z3)
Параметры аппроксимации	A	1070,3534	1508,0583	1159,8476	584,9879	1346,3154
	B	-244,4846	-344,1460	-260,0055	-134,0331	-308,4293
Ширина запрещённой зоны, эВ		4.378	4.382	4.461	4.365	4.365

Исследование ИК-спектров поглощения проводилось на ИК-Фурье спектрометре IFS 66v/S. Аналогичные спектры изучались в работе [4], но линия 1580 см⁻¹ с энергией 0,195 ± 0,01 эВ в кристаллах α -LiIО₃, оказалась слабо изученной. Линии ИК-спектров как правило обозначают волновыми числами в см⁻¹, хотя другие виды спектров, например, ЯМР-спектры, измеряют энергию в эВ. Соотношение волнового числа и

энергии из формулы Планка $E = hc/\lambda$ получено в виде 1 см⁻¹ = 1,24·10⁻⁴ эВ.

При выращивании кристаллов из смеси обычной и тяжелой воды происходит обмен изотопов, протекающий по схеме: D₂O + H₂O = 2HDO. То есть изотопы водорода H в обычной воде или дейтрона D в тяжелой воде сосредоточены в молекулах HDO.

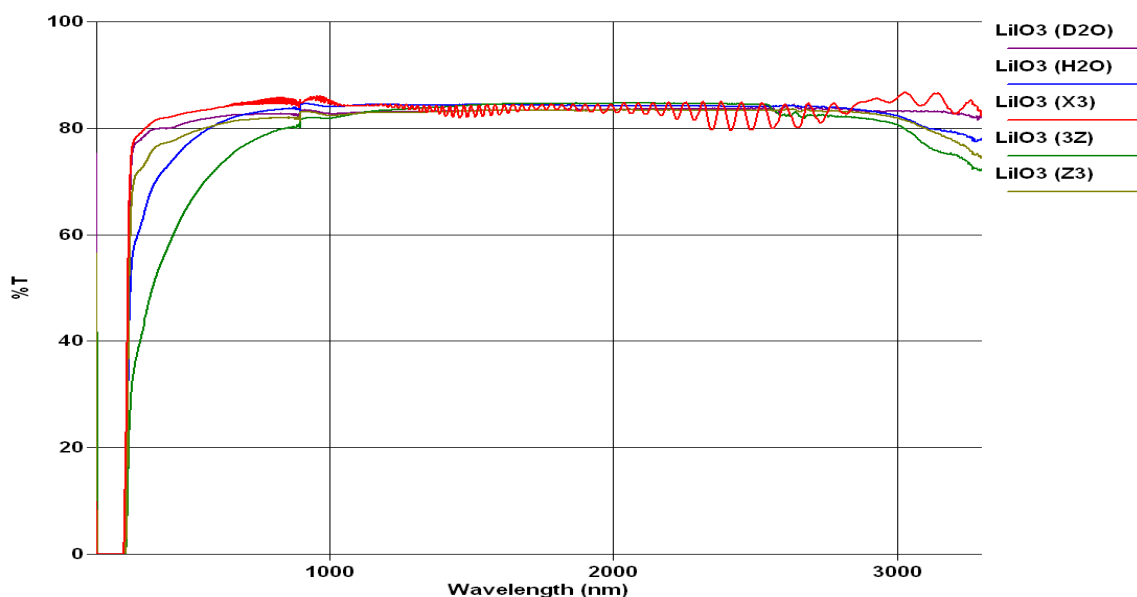


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропускания T от длины волны для кристаллов α - LiIO_3 по различным направлениям

2. Результаты и их обсуждение

В работе [6] были определены параметры ИК-спектров поглощения молекул тяжёлой воды. Также установлено, что колебания соединений HDO и H_2O ответственны за появление в спектре поглощения широких полос в диапазоне $(1350...1750) \text{ см}^{-1}$, центрированных при 1460 см^{-1} (HDO) и 1650 см^{-1} (H_2O), соответственно. Как видно из спектров изученных кристаллов, полоса поглощения HDO превосходит полосу H_2O , а соотношение их максимумов меняется в зависимости от концентрации тяжёлой воды с 6:5 (0,02 ат. %) до ~2:1 (53,51 ат. % и более). Анализ полосы поглощения кристаллов иодата лития в полосе $(1450...1650) \text{ см}^{-1}$ свидетельствует о её двойной конструкции, что хорошо наблюдается на рисунках 4 и 5, откуда видно, что она является суперпозицией по меньшей мере двух максимумов поглощения, имеющих максимумы при ~1550 и ~1600 см^{-1} . Соотношение коэффициентов поглощения α этих полос для кристаллов (H_2O), получилось ~1:1 (75:74 см^{-1}), а для кристаллов, выращенных в D_2O , это соотношение равно ~2:1 (161:82 см^{-1}). Постоянная разрешающая способность в обычных спектрометрах зависит от угла, под которым расположена кристаллическая решётка образца к световому пучку, она меняется с частотой и составляет не более 2%.

В [7] выяснили, что свободная молекула HDO в воде H_2O даёт спектральную линию 1476 см^{-1} в диапазоне $(1550...1390) \text{ см}^{-1}$. Для полосы 1580 см^{-1} определена ширина $(1650...1450) \text{ см}^{-1}$, что показывает наложение этих полос. Это позволяет заключить, что в кристалле, выращенном в D_2O ,

полоса $(1450...1650) \text{ см}^{-1}$ определяется релаксацией молекул HDO (1550) и H_2O (1600 см^{-1}) (табл.2), что хорошо коррелирует с результатами работы [3], где обнаружено присутствие транспорта протонов в H/D -обмене во льду.

На рисунках 4 и 5 видно, что для кристаллов, выращенных в D_2O , коэффициент поглощения в два раза больше, чем в H_2O , что указывает на существование H/D -обмена. На ИК-спектре хорошо просматриваются линии 2170 см^{-1} (H_3O^+ , 0,27 эВ), 2941 см^{-1} (H^+ , 0,365 эВ) и гидроксидов OH^- (3055 см^{-1} и 3170 см^{-1} с энергиями 0,38 эВ и 0,40 эВ) (рис. 4). Отсюда следует, что ионы гидроксидов OH^- заметно поглощают в этом диапазоне. Появление молекул HDO можно объяснить трансляционной диффузией протонов, что также указано для кристаллов KHCO_3 в [8,9]. Для кристаллов α - LiIO_3 (из D_2O) эти линии не наблюдаются (рис. 5). Экспериментально показано, что в кристалле, выращенном в D_2O , отсутствуют полосы, вызванные релаксацией H_3O^+ , H^+ и OH^- , а полосы, обусловленные релаксацией ионов D_3O^+ , не выявляются из-за низкой подвижности дейтронов. Для температуры $T = 300 \text{ K}$ подвижность протонов, рассчитанная по формуле $\mu = \frac{a^2 q v_0}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{kT}\right)$ [12], равна $3,83 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, что превышает подвижность ионов H_3O^+ в кристаллах льда [13], где получено $7,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, и заметно превышает подвижность дефектов D_3O^+ . В формуле принято $a \approx 0,2 \text{ нм}$ – междоузельное расстояние, равное 0,219 нм. Это расстояние соответствует расстоянию между соседними позициями протона в решётке иодата лития. Здесь $v_0 = 2 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ – частота перескоков протонов, $\Delta E_a = 0,054 \text{ эВ}$ – энергия активации протонов по спектрам ЯМР [13].

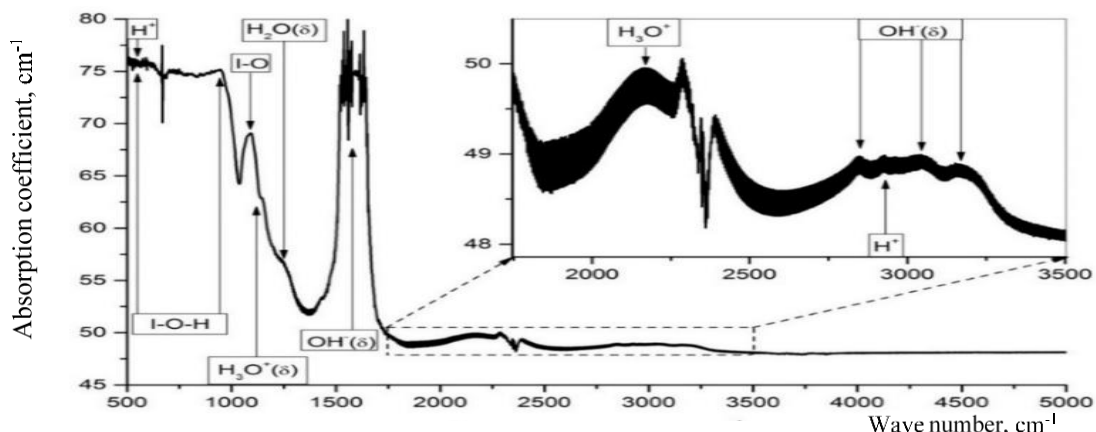


Рис. 4. Инфракрасный спектр поглощения монокристаллов α - LiIO_3 , выращенных в H_2O вдоль оси Z (C_6)

В [10] показана высокая вероятность туннелирования протонов, что свидетельствует о реальной возможности образования молекул HDO. На ЯМР спектрах кристаллов, выращенных в D_2O , получено 2 близко расположенных максимума [13], что свидетельствует о наличии двух частиц, а именно протона и дейтрона. Кроме того, малая величина энергии активации 0,054 эВ подтверждает присутствие процесса туннелирования протонов.

Результаты, полученные по ИК-спектрам, хорошо коррелируют с результатами исследования спектров термостимулированных токов [11,12], где также получено низкое значение энергии активации 0,07 эВ низкотемпературного максимума, обусловленного туннелированием протонов, что свидетельствует о надёжности ИК-спектроскопии для диагностики тяжёлой воды.

Систематически появляющиеся линии 2339 см^{-1} (0,29 эВ) в ИК-спектрах разных кристаллов можно объяснить наличием азота в объёме спектрометра.

Таблица 2

Линии ИК-спектра поглощения кристаллов α - LiIO_3

№ линии	Волновое число ν , см^{-1}	Энергия по ИК-спектру, эВ	Тип колебания
1	550	0.07	H^+
2	950	0.11	I-O-H
3	1080	0.166	I-O
4	1150	0.143	$\text{H}_3\text{O}^+(\delta)$
5	1260	0.157	$\text{H}_2\text{O}(\delta)$
6	1580	0.20	OH^+ , HDO
7	1650	0.22	$\text{H}_2\text{O}(\delta)$, $\text{H}_3\text{O}^+(\delta)$
8	2200	0.26	$\text{H}_2\text{O}(\delta)$ (кристаллографическ)
9	2940	0.365	H^+
10	3240	0.40	$\text{OH}^+(\nu)$, VL

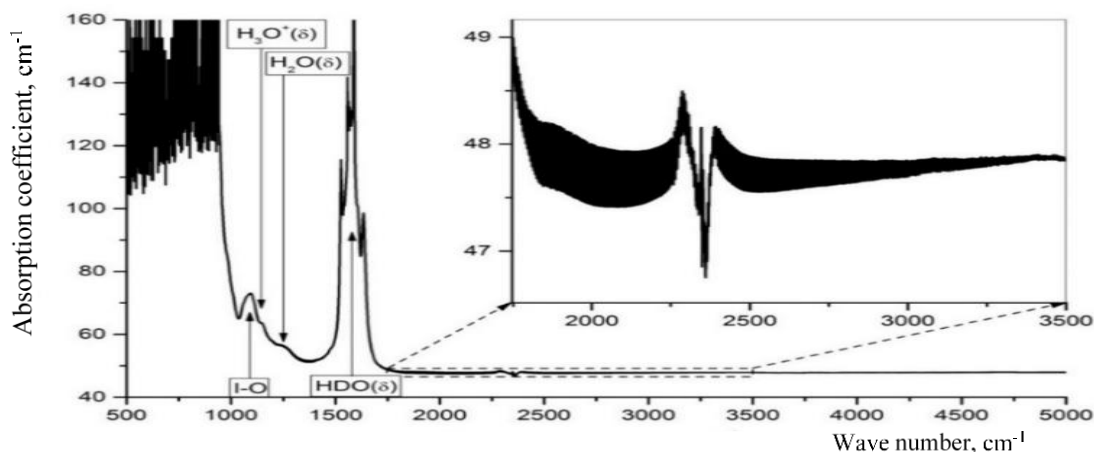


Рис. 5. Инфракрасный спектр поглощения монокристаллов α - LiIO_3 , выращенных в D_2O вдоль оси Z (C_6)

Заключение

Таким образом, сравнение ИК-спектра кристаллов, выращенных в H_2O , со спектрами других кристаллов позволяет применять разработанную методику для диагностики молекул D_2O и HDO в кристаллах, наличие которых понижает прозрачность кристаллов, что подтверждается в патенте [15].

Для кристаллов α - LiIO_3 , выращенных в H_2O и D_2O , доказано наличие трансляционной диффузии протонов. Полученные ИК-спектры подтверждают присутствие центров поглощения, связанных с колебаниями ионов H^+ и их производных H_3O^+ и OH^- , а также молекул H_2O и HDO , что доказываем наличие H/D -обмена в кристаллах с водородными связями. Показано, что полоса $(1450\ldots 1650) \text{ см}^{-1}$ является суперпозицией двух полос поглощения, центрированных при ~ 1550 и $\sim 1600 \text{ см}^{-1}$. Экспериментально установлено, что соотношение коэффициентов поглощения указанных полос составило $\sim 1:1$ ($75:74 \text{ см}^{-1}$) для кристаллов, выращенных в H_2O , и $\sim 2:1$ ($161:82 \text{ см}^{-1}$) для кристаллов, выращенных в D_2O . Это позволяет

сделать вывод о том, что полосы 1550 см^{-1} и 1600 см^{-1} связаны с колебаниями молекул H_2O и HDO .

Разработанная методика позволяет также контролировать качество кристаллов, применяемых в навигационных целях в лазерных маяках и для контроля паросодержания и обнаружения протечки в контуре теплоносителя ядерного реактора. Метод ИК-спектроскопии так же может применяться для диагностики материалов, испытывающих вибрации в судовых механизмах, что отмечается в работе [16]. Кристаллы α - LiIO_3 применяют так же при мониторинге кристаллических материалов датчиков, контролирующих состояние теплоносителя в ядерных реакторах, а так же присутствие закиси азота в выбросах на морских судах [17,18], поскольку при их попадании в рабочую камеру двигателя с горючим снижается температура всасываемого воздуха и повышается интенсивность сгорания топлива. Метод лазерного мониторинга с применением кристаллов иодата лития также используется для измерения концентрации водорода в атмосфере [19].

Литература

1. Манкевич С.К., Орлов Е.П. Патент РФ Лазерная система для мониторинга атмосферы в технических помещениях атомных электростанций. № 2 746 522. Оpubл. 15.04.2021. Бюл. № 11.
2. Petrenko V.F., Ryzhkin V.F. Dielectric properties of ice in the presence of space charge Phys. Stat. Solidi (b), 1984, Vol.121, P. 421.
3. Lee C., Lee P., Kim Y., Kanda H. Mechanistic study of proton transfer and H/D exchange in ice films at low temperatures (100–140 K). J. Chem. Phys. 2007, Vol.127, 084701.
4. Timokhin V.M., Garmash V.M., Tedzhetov V.A. Infrared spectroscopy and tunneling of protons in crystals with hydrogen bonds. Optics and Spectroscopy, 2017, Vol. 122 (6). P. 889–895.
5. Silambarasan A., Rajesh P., Ramasamy P., Karnal A.K., Bhatt R., Bhaumik I, Gupta P.K. Investigation of the bulk growth of α - LiIO_3 single crystals and the influence of pH on its structural, morphological and optical characteristics. Bull. Mater. Science. 2017, Vol. 40 (4). P. 783–789.
6. Voronina T.V., Slobodov A.A. Spectroscopy and thermodynamic study of heavy water. Optical journal. 2011, Vol. 3. (78). P. 3–9.
7. Orlovsky V. M., Panarin V. A. Dynamics of changes in the IR spectrum of distilled water and heavy water when irradiated with an electron stream of nanosecond duration. In Letters to JETP. 2017. Vol. 43. P. 11-16
8. Lin L, Morrone J.A., Car R. J. Stat. Phys. 2011. Vol. P. 145 365.
9. Fillaux Fr. Proton transfer in the KHCO_3 and acid crystals: a quantum view // Journal of Molecular Structure (Netherlands). 2007. Vol.844. P. 308.
10. Тимохин В.М., Теджетов В.А. Квантово-механический подход к эффекту туннелирования и трансляционной диффузии протонов в кристаллических материалах. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1. С. 259-269.
11. Timokhin V.M. The mechanism of dielectric relaxation and proton conductivity in α - LiIO_3 nanostructure // Russian Physics Journal, Springer New York Consultants Bureau. 2009. Vol.52. (3). P. 269-274.
12. Timokhin V.M., Garmash V.M., Tedzhetov V.A. Technologie of thermally stimulated diagnostics of anisotropy and optical axes in crystals. Modern Electronic Materials. 2020. Vol.6 (4). P.1-8. DOI 10.3897/j.moem.6.4.65351.
13. Timokhin V.M., Garmash V.M., Tarasov V.P. NMR spectra and translational diffusion of protons in crystals with hydrogen bonds. Physics of the Solid State. 2015. Vol. 57 (7). P. 1314-1317.
14. Maeno N. Ice Science. Moscow, Mir. 1988. P. 230.
15. Тимохин В.М., Гармаш В.М., Теджетов В.А. Патент РФ Способ спектральной диагностики тяжелой воды в кристаллических материалах. № 2753904. Оpubл. 24.08.2021. Бюл. № 24.
16. Николаев Н.И., Гриценко М.В., Герасиди В.В. Результаты контроля вибрации судовых технических средств в эксплуатации в соответствии с требованиями правил РС и зарубежных норм. Морские интеллектуальные технологии/Marine intellectual technologies, 2019, № 4, Т.3, С.96-103.
17. Turkin V.A., Sarychev I.A., Ignatenko A.V., Aleksandrova V.V. Monitoring pollution from ship power plants with laser technologies. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. Vol.1, p. 867. 012177.
18. Turkin V.A., Cherbachy Y.V., Shemanin V.G., Dzhiyev R.I., Lidar monitoring of nitrogen and sulphur oxides molecules in ship power installation emissions. Computer simulation, IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2021. Vol. 1, p. 672. 012005.
19. Привалов В. Е., Туркин В. А., Шеманин В. Г. Лидар комбинационного рассеяния света для обнаружения утечек из резервуаров и двигателей горного транспорта, работающего на водороде // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 7-1. – С. 116–125. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_116.

References

1. Mankevich S.K., Orlov E.P. Patent RF Lazernaya sistema dlya monitoringa atmosfery v tekhnicheskikh pomeshcheniyakh atomnykh elektrostantsiy. № 2 746 522. Opubl. 15.04.2021. Byul. № 11.
2. Petrenko V.F., Ryzhkin V.F. Dielectric properties of ice in the presence of space charge *Phys. Stat. Solidi* (b), 1984. Vol.121. P. 421.
3. Lee C., Lee P., Kim Y., Kanda H. Mechanistic study of proton transfer and H/D exchange in ice films at low temperatures (100–140 K). *J. Chem. Phys.* 2007. Vol.127. 084701.
4. Timokhin V.M., Garmash V.M., Tedzheto V.A. Infrared spectroscopy and tunneling of protons in crystals with hydrogen bonds. *Optics and Spectroscopy*. 2017. Vol.122 (6) P. 889–895.
5. Silambarasan A., Rajesh P., Ramasamy P., Karnal A.K., Bhatt R., Bhaumik I, Gupta P.K. Investigation of the bulk growth of α -LiIO₃ single crystals and the influence of pH on its structural, morphological and optical characteristics. *Bull. Mater. Science*. 2017. Vol. 40 (4) P. 783–789.
6. Voronina T.V., Slobodov A.A. Spectroscopy and thermodynamic study of heavy water. *Optical journal*. 2011. Vol. 3 (78). P. 3–9.
7. Orlovsky V. M., Panarin V. A. Dynamics of changes in the IR spectrum of distilled water and heavy water when irradiated with an electron stream of nanosecond duration. In *Letters to JETP*. 2017. Vol. 43. P. 11–16.
8. Lin L, Morrone J.A., Car R. *J. Stat. Phys.* 2011. Vol.145. P. 365.
9. Fillaux Fr. Proton transfer in the KHCO₃ and acid crystals: a quantum view. *Journal of Molecular Structure* (Netherlands). 2007. Vol.844. P. 308.
10. Timokhin V.M., Tedzheto V.A. Kvantovo-mekhanicheskiy podkhod k efektu tunnelirovaniya i translyatsion-noy diffuzii protonov v kristallicheskikh materialakh. *Morskiye intellektualnyye tekhnologii*, 2024. № 1 chast 1. S.259–269.
11. Timokhin V.M. The mechanism of dielectric relaxation and proton conductivity in α -LiIO₃ nanostructure // *Russian Physics Journal*, Springer New York Consultants Bureau. 2009. V.52. (3). P. 269–274.
12. Timokhin V.M., Garmash V.M., Tedzheto V.A. Technologie of thermally stimulated diagnostics of anisotropy and optical axes in crystals. 2020. Vol.6 (4). P.1–8. DOI 10.3897/j.moem.6.4.65351.
13. Timokhin V.M., Garmash V.M., Tarasov V.P. NMR spectra and translational diffusion of protons in crystals with hydrogen bonds. *Physics of the Solid State*. 2015. Vol. 57 (7). P. 1314–1317.
14. Maeno N. *Ice Science*. Moscow. Mir. 1988. P. 230.
15. Timokhin V.M., Garmash V.M., Tedzheto V.A. Patent RF Sposob spektralnoy diagnostiki tyazhyoloy vody v kristallicheskikh materialakh. № 2753904. Opubl. 24.08.2021. Byul. № 24.
16. Nikolayev N.I., Gritsenko M.V., Gerasidi V.V. Rezultaty kontrolya vibratsii sudovykh tekhnicheskikh sredstv v ekspluatatsii v sootvetstvii s trebovaniyami pravil RS i zarubezhnykh norm. *Morskiye intellektualnyye tekhnologii/Marine intellectual technologies*, 2019, № 4, T.3, S.96–103.
17. Turkin V.A., Sarychev I.A., Ignatenko A.V., Aleksandrova V.V. Monitoring pollution from ship power plants with laser technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021. Vol.1, p. 867. 012177.
18. Turkin V.A., Cherbachi Y.V., Shemanin V.G., Dzhioev R.I., Lidar monitoring of nitrogen and sulphur oxides molecules in ship power installation emissions. Computer simulation, *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2021. Vol. 1, p. 672. 012005.
19. Privalov V. E., Turkin V. A., Shemanin V. G. Lidar kombinatsionnogo rasseyaniya sveta dlya obnaruzheniya utechek iz rezervuarov i dvigateley gornogo trans porta, rabotayushchego na vodorode // *Gornyy infor-matsionno-analiticheskiy byulleten*. 2024. № 7-1. – S. 116–125. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_116.

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

Тимохин Виктор Михайлович. Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика и физика» ФГБОУ ВО «ГМУ им. адмирала Ф.Ф. Ушакова», 353918, пр. Ленина, 93, г. Новороссийск, профессор Российской Академии Естествознания, e-mail: t.v.m@inbox.ru. Тел. 8 (918) 450-45-73

Viktor M. Timokhin, Ph.D. (Phys & Math), Assistant professor at the Higher Mathematics and Physics Department, Admiral Ushakov Maritime State University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk, 353918, professor of Russian Academy of Natural Sciences, Russian Federation, E-mail: t.v.m@inbox.ru. Tel. 8-918 450-45-73.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.08.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 26.12.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 25.01.2026.

Научная статья

УДК 656.6.058;681.323

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.023>

Анализ обеспечения функциональной безопасности морского транспорта с учётом экологических аспектов

Скороходов Д.А.¹ skorohodda@mail.ru, Малыгин И. Г.^{1,2} malygin_com@mail.ru,

Каминский В.Ю.¹ Kaminskyvy@yandex.ru

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, ²Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Аннотация. В статье представлена системная концепция обеспечения безопасности морского транспортного комплекса (МТК), рассматриваемого в виде мегасистемы с многоуровневой структурой и сложными внутренними взаимосвязями. На основе анализа функциональных связей между элементами МТК выделены ключевые компоненты безопасности, подлежащие углубленному исследованию. Определены основные факторы, способные инициировать аварийные и катастрофические события, включая техногенные, природные и организационно-управленческие риски. Предложена структурированная модель безопасности, охватывающая: конструктивную безопасность судов и средства её повышения; безопасность судоходства; безопасность технологических операций и объектов в портах; а также безопасность систем управления судном и организационно-управленческих процедур. Результаты анализа позволяют сформулировать приоритетные направления повышения эффективности мер безопасности и создать основу для разработки интегрированной системы оценки и управления рисками в МТК.

Ключевые слова: морской транспортный комплекс, конструктивная безопасность судов, безопасность судоходства, портовая безопасность, управление судном, оценка рисков, системный анализ безопасности.

Финансирование: работа выполнена в рамках исполнения государственного задания ИПТ РАН № 075-00605-26-00 на 2026 год и плановый период 2027 и 2028 годов за счет средств предоставленной Минобрнауки России субсидии (соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 20.01.2026 № 075-03-2026-498).

Для цитирования: Скороходов Д.А., Малыгин И.Г., Каминский В.Ю. Анализ обеспечения функциональной безопасности морского транспорта с учётом экологических аспектов, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 221—229. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.023.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.023>

Analysis of ensuring the functional safety of marine transport, taking into account environmental aspects

Dmitriy A. Skorokhodov¹ skorohodda@mail.ru, Igor G. Malygin^{1,2} malygin_com@mail.ru,

Valery Yu. Kaminsky¹ Kaminskyvy@yandex.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, ²Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Russian Federation

Abstract. The article presents the system concept of ensuring the safety of the marine transport complex (MTK), considered as a megasystem with a multilevel structure and complex internal interconnections. Based on the analysis of the functional relationships between the elements of the MTK, key security components are identified that are subject to in-depth research. The main factors capable of initiating emergency and catastrophic events, including man-made, natural, and organizational and managerial risks, have been identified. A structured safety model is proposed that covers: the constructive safety of ships and the means to improve it; the safety of navigation; the safety of technological operations and facilities in ports; as well as the safety of ship management systems and organizational and managerial procedures. The results of the analysis make it possible to formulate priority areas for improving the effectiveness of security measures and create the basis for the development of an integrated risk assessment and management system in the MTC.

Keywords: marine transport complex, ship structural safety, navigation safety, port safety, ship management, risk assessment, safety system analysis.

Financial Support: the work was carried out under the state assignment of the IPT RAS № 075-00605-26-00 for 2026 and the planned period of 2027 and 2028 funded by a subsidy provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement on the provision of subsidies from the federal budget for financial support for the implementation of the state task dated 20 January 2026 № 075-03-2026-498).

For citation: Dmitriy A. Skorokhodov, Igor G. Malygin, Valery Yu. Kaminsky. Analysis of ensuring the functional safety of marine transport, taking into account environmental aspects, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 221—229. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.023.

Введение

В условиях интенсификации морских перевозок и усиления антропогенного воздействия на морские экосистемы проблематика обеспечения безопасности морского транспорта приобретает системообразующее значение. Современные исследования в этой области демонстрируют фрагментарный характер подходов, что проявляется в преобладании ведомственных решений без комплексной интеграции функциональных и экологических аспектов безопасности [1-5]. Так, в работах [1, 3] анализируются вопросы безопасности судоходства и энергетической эффективности морского транспорта, в [2, 5] рассматриваются методы оценки экологической безопасности водной транспортировки грузов и объектов инфраструктуры, а в [4] исследуются проблемы системного управления безопасностью судоходных компаний.

Ужесточение международных и национальных экологических требований ставит перед научным сообществом задачу обеспечения стратегической роли морского транспорта в национальной безопасности при одновременном снижении его негативного воздействия на морские экосистемы.

Современное состояние исследований выявляет системные недостатки в подходах к анализу безопасности морского транспортного комплекса (МТК). Предлагаемые решения зачастую не учитывают его природу как сложной динамической мегасистемы, характеризующейся пространственной мобильностью транспортных средств, многоуровневым взаимодействием элементов береговой и морской инфраструктуры, а также нелинейностью последствий аварийных ситуаций для окружающей среды. Отсутствие единой методологической базы приводит к несогласованности критериев оценки безопасности и затрудняет комплексное управление рисками.

В настоящей статье разработан системный подход к анализу безопасности морского

транспортного комплекса, объединяющий функциональные и экологические аспекты в единую методологическую концепцию, которая позволяет преодолеть фрагментарность существующих решений и обеспечить комплексную оценку безопасности с позиций теории мегасистем.

Акцент на системной взаимосвязи элементов транспортного комплекса и их взаимодействии с окружающей средой создает основу для разработки эффективных механизмов управления экологическими рисками в условиях реализации глобальных стратегий устойчивого развития морского транспорта.

Формирование концепции обеспечения безопасности МТК

Морской транспортный комплекс относится к открытым человеко-машинным (полуэргатическим) системам, представляющим совокупность совместно действующих составляющих, находящихся в определенных отношениях друг с другом и образующих единство:

- морских транспортных средств (МТС), в нашем случае морских судов;
- морских коммуникаций;
- транспортной инфраструктуры, в том числе портовой;
- трудовых ресурсов.

Целостность морского транспортного комплекса как сложной организационно-технической системы определяется неаддитивностью её свойств: функциональная и безопасная устойчивость системы в целом нарушается при исключении хотя бы одной ключевой подсистемы (рис. 1). Это свидетельствует о наличии в комплексе взаимозависимых элементов, где динамика состояния любого компонента оказывает системообразующее влияние на параметры и поведение остальных структурных элементов.



Рис. 1. Взаимодействие функциональных элементов МТК

Как видно из рис. 1, функционирование МТК характеризуется техническими, информационными, законодательно-правовыми, экономическими и трудовыми связями. Наличие связей между составляющими МТК усложняет проблему обеспечения безопасности и требует применения системного анализа, обеспечивающего деление проблемы на составляющие, которые позволили бы разработать методические и технические предложения для ее решения. Как и другие сложные организационно-технические системы, МТК обладают отличительными признаками, к которым относятся:

- иерархическая структура, включающая в себя большое число взаимосвязанных элементов (подсистем);
- наличие общей цели функционирования системы, которой подчинены конкретные задачи функционирования отдельных подсистем;
- наличие интенсивных потоков информации;
- функционирование в условиях воздействия случайных факторов, в том числе и факторов внешней среды;
- уязвимость при воздействии случайных факторов;
- наличие черт самоорганизации, т.е. способность приходить к новому устойчивому состоянию вследствие изменения внутренних свойств.

Перечисленные признаки свидетельствуют о том, что МТК присущи свойства мегасистем:

- **слабопредсказуемость:** никакое сколь угодно подробное знание каждого из элементов мегасистемы, сколь угодно подробное и точное знание поведения ее в прошлом не позволяют точно предсказать ее состояние в будущем;
- **целенаправленность:** любая мегасистема в определенных пределах в состоянии управлять своей энтропией при случайном воздействии и способна функционировать, преследуя определенные цели;
- **самоорганизация:** рынок, в котором действует транспортный комплекс, обеспечивает управление за счет обратных связей, возникающих между составляющими его элементами.

Опыт эксплуатации МТК показывает, что учесть все факторы, отрицательно влияющие на безопасность системы, и исключить их неблагоприятные воздействия на человека и природу не удастся из-за случайной, объективной природы этих факторов. Даже выполнив все технические, организационные и другие мероприятия, нельзя утверждать, что будет исключен риск перехода системы в опасное состояние. Риск - неотъемлемое свойство любой сложной системы и абсолютная безопасность такой системы недостижима.

Необходимо различать желаемый идеал (абсолютную безопасность), техническую возможность и экономическую целесообразность допустимого (реально достижимого сегодня) уровня безопасности. Поэтому следует говорить о разумно допустимом уровне опасности (риске), достижение которого часто требует непростых технических решений и существенных экономических затрат.

Главной целью МТК является перевозка грузов (пассажиров) с минимально возможными

материальными, энергетическими и временными затратами по заданному маршруту без допустимого изменения их состояния, состояния технических средств МТК, обслуживающего персонала, окружающей среды и населения, находящегося в зоне влияния перевозочного процесса. Понятие "перевозка" включает в себя все операции от приема объектов транспортировки в пункте отправления до выгрузки их в пункте назначения.

Под недопустимым изменением состояния МТК следует понимать нанесение ущерба различной степени тяжести здоровью участникам движения (персонал судов, пассажиры, население, находящегося в зоне влияния перевозочного процесса), окружающей среде, сохранности объектов перемещения (по количеству и качеству), а также повреждение или уничтожение технических средств МТК, транспортной инфраструктуры и другого имущества посредством факторов, вызывающих те или другие аварийные ситуации, к которым относятся:

- неблагоприятные воздействия окружающей среды;
- выход из строя оборудования судов и вспомогательных средств обеспечения транспортировки;
- ошибочные действия персонала судов и портов, управляющего персоналом судоходных компаний;
- воздействие грузов, функциональных систем и устройств;
- неудовлетворительные динамические свойства судов.

Безопасность морского транспортного комплекса (МТК) определяется как состояние динамической устойчивости системы в процессе транспортировки грузов и пассажиров по заданному маршруту. Данное состояние характеризуется минимизацией материальных, энергетических и временных затрат при сохранении параметров функционирования комплекса, технических средств, персонала, окружающей среды и населения в зоне воздействия транспортного процесса в пределах установленных нормативных ограничений.

Особенности МТК, как сложной организационно-технической системы, позволяют сформулировать составляющие безопасности, характерные для МТК:

- конструктивная безопасность судов;
- безопасность движения судов;
- безопасность сохранности объектов транспортировки;
- безопасность управления МТК и обслуживания судов;
- безопасность окружающей среды [6].

Каждая из этих составляющих имеет специфические особенности и требует рассмотрения в рамках оценки безопасности МТК.

Принципы оценки конструктивной безопасности судна

Конструктивная безопасность судна [7] представляет собой совокупность следующих взаимосвязанных компонентов: безопасность корпусных конструкций, надежность энергетической установки, безопасность функционирования технологических систем и оборудования, устойчивость информационно-управляющих систем,

а также обеспечение экологической безопасности в зоне эксплуатации судна. Безопасность корпусных конструкций судна обеспечивается на всех этапах жизненного цикла — от проектирования до ремонта — за счет комплексной реализации следующих принципов.

На этапе проектирования. Учитываются эксплуатационные и экстремальные нагрузки, действующие на корпус, разрабатываются меры по антикоррозионной защите, а также обеспечивается соответствие требованиям огнестойкости. Последние включают сохранение несущей способности, целостности конструкций и теплозащитных свойств в течение нормируемого времени при пожаре.

В процессе эксплуатации. Безопасность оценивается в условиях штормового волнения через анализ:

- остойчивости и прочности корпуса;
 - герметичности отсеков и надежности технологических систем;
 - управляемости судна.
- Критическими факторами риска являются:
- динамические напряжения при интенсивной качке с высокими амплитудами и ускорениями;
 - гидродинамические удары (слеинг), особенно днищевого типа;
 - заливаемость носовой оконечности;
 - кавитационные явления при оголении гребного винта;
 - следование на попутном волнении значительной высоты.

Для минимизации рисков определяется оптимальное количество водонепроницаемых отсеков и противопожарных зон, а также устанавливается регламент технических осмотров и ограничений на загрузку судна.

При проведении ремонтных работ. Осуществляется оценка рисков локальных разрушений конструкций, а также анализ дополнительных угроз, связанных с временными изменениями распределения нагрузок, снижением резервной прочности и пожарной безопасности.

Современный уровень развития судостроительных технологий позволяет реализовывать следующие стратегии обеспечения безопасности судна как в автономном режиме, так и в комбинации: стратегию безотказности, направленную на минимизацию вероятности отказов технических систем на этапе проектирования; стратегию отказоустойчивости, предполагающую сохранение работоспособности за счёт резервирования критических узлов и адаптивного управления; а также стратегию безопасного деградированного состояния, обеспечивающую контролируемый переход судна в безопасный режим при критических отказах. Важно отметить, что показатели надёжности, регламентируемые ГОСТ 27.002-2015, определяют конструктивную безопасность исключительно в условиях штатной эксплуатации. В аварийных ситуациях ключевую роль играют характеристики живучести, нормируемые классификационными (регистрационными) обществами (например, Правила Российского морского регистра судоходства), которые отражают способность судна сохранять основные функции после повреждений.

Данный аспект безопасности формируется преимущественно на стадиях проектирования и производства через внедрение инженерных решений: оптимизацию структурной схемы корпуса и систем, применение материалов с повышенной огнестойкостью, разработку интегрированных систем автоматического диагностирования, а также рациональное распределение функциональных резервов. Комплексный учёт этих факторов позволяет обеспечить соответствие судна как текущим эксплуатационным требованиям, так и критериям безопасности в экстремальных условиях, что подтверждается практикой проектирования современных морских объектов, сертифицированных по стандартам SOLAS и MARPOL.

Принципы оценки безопасности движения судна

Безопасность движения судна представляет собой комплексное понятие, интегрирующее навигационные, технические, эргономические и организационные аспекты управления движением. Данная категория служит основой общей безопасности морского объекта, поскольку определяет способность судна предотвращать аварийные ситуации, сохранять управляемость в экстремальных условиях и минимизировать риски для экипажа, груза и окружающей среды в соответствии с требованиями Международной конвенции по охране человеческой жизни на море (SOLAS, глава V).

Безопасность движения судна характеризуется [3,8]:

- безопасностью маршрута движения (коммуникаций);
- безопасностью объектов транспортировки;
- безопасностью от внешних воздействий на маршруте движения (время движения, метеорологические условия, состояние пути следования, количество судов на пути движения и т.д.);
- безопасностью трудовых ресурсов (персонала судна).

Безопасность плавания по морским судоходным путям обеспечивается комплексным применением береговых и плавучих навигационных средств. К береговой инфраструктуре относятся маяки, сигнальные станции, передающие гидрометеорологические и навигационные предупреждения, а также технические системы — радиолокационные станции, автоматизированные комплексы управления движением судов, радиомаяки кругового и направленного излучения. Плавучие средства включают бакены, буи и вежи, а также знаки Международной ассоциации морских средств навигации и маячных служб (IALA), классифицируемые на латеральные, кардинальные, осевые, специального назначения и обозначающие новые опасности [9].

Экологическая безопасность перевозок определяется множеством факторов. Ключевыми рисками являются нарушение целостности упаковки опасных грузов (включая пестициды, рудные концентраты), выбросы вредных веществ от судовых энергетических установок и аварийные сбросы за борт [10]. Техногенное воздействие усугубляется химическими свойствами грузов: хлорорганические

соединения, такие как гербицид пиклорам, сохраняют токсичность в водной среде, подавляя не только целевые организмы, но и представителей природных экосистем. Рудные концентраты при длительном контакте с морской водой выделяют летучие соединения меди, цинка и свинца. Особую угрозу представляют нефтяные разливы в прибрежных зонах, где углеводороды глубоко проникают в донные осадки, сохраняя токсичность из-за анаэробных условий, замедляющих деградацию. Радиоактивные элементы, в свою очередь, демонстрируют неравномерное распределение в Мировом океане, формируя локальные зоны повышенного загрязнения.

В настоящее время основными направлениями поиска новых технологий в сфере развития морского транспорта являются: использование новых видов топлива, наносящего минимальный вред экологии: СПГ, биотоплива, возобновляемой энергии ветра, солнца и т.д., а также создание экономичного и роботизированного беспилотного транспорта [11].

Новые инженерные решения также играют ключевую роль в минимизации рисков. На нефтеналивных танкерах критически важны грузовые и балластные системы, включающие трубопроводы с запорной арматурой, сепараторы и контрольно-измерительные приборы. Погрузка контролируется береговыми информационными системами, тогда как выгрузка осуществляется судовыми насосами. Одним из опасных сценариев при работе с грузами является расслоение сжиженных газов (бутана и пропана) с последующим выбросом в атмосферу. Эффективность очистки сточных вод, загрязненных нефтепродуктами, синтетическими моющими средствами и техническими жидкостями, обеспечивается применением многоступенчатых систем, соответствующих требованиям Приложения IV к MARPOL 73/78.

Внешние условия и человеческий фактор существенно влияют на безопасность плавания. Гидрометеорологические параметры — волнение, ветер, соленость воды, ледовая обстановка, атмосферные фронты — регламентируются стандартами Всемирной метеорологической организации (WMO-No. 8) [9].

Оценка экологической безопасности экипажа проводится по аддитивному критерию, включающему параметры микроклимата (шум, вибрация, электромагнитные поля, качка). Для агрегации разнородных показателей используются функции Харрингтона, нормируемые в относительных единицах [10]. Статистика Российского морского регистра судоходства указывает, что большинство аварий обусловлены человеческим фактором: нарушением Правил МППСС-72, недостаточным знанием маневренных характеристик судов и несоблюдением требований в сложных метеоусловиях.

Таким образом, обеспечение безопасности морского транспорта требует системного подхода, объединяющего навигационное оборудование, экологические стандарты, инженерные решения и управление человеческими рисками. Интеграция нормативных требований ИМО, MARPOL и классификационных правил с современными методами оценки (включая аддитивные критерии и

функции Харрингтона) позволяет минимизировать как аварийные ситуации, так и экологические последствия судоходства. Дальнейшее совершенствование этой системы предполагает внедрение методов анализа жизненного цикла (ISO 14040) и моделей оценки человеческого фактора, таких как SHELL (Software, Hardware, Environment, Liveware), верифицированных документами ИМО MSC-MEPC.3/Circ.4.

Принципы оценки безопасности объектов транспортировки в портах

Безопасность объектов транспортировки в портах характеризуется:

- противопожарной безопасностью мест дислокации объектов транспортировки;
- безопасностью охраны объектов транспортировки от несанкционированного доступа и террористических действий;
- безопасностью условий размещения объектов транспортировки;
- экологической безопасностью.

Потери грузов, обусловленные условиями хранения, в критических ситуациях (особенно при возникновении пожаров) могут достигать катастрофических масштабов. Данная проблема определяет необходимость привлечения высококвалифицированного персонала и внедрения специализированных информационно-аналитических систем, автоматизирующих процессы управления складскими операциями. Такие системы снижают зависимость от человеческого фактора и позволяют оптимизировать требования к профессиональной подготовке сотрудников.

Взрывопожаробезопасность складских комплексов портовой инфраструктуры представляет собой наиболее ресурсоемкий и ответственный аспект обеспечения безопасности транспортных грузов. Реализация современных требований (в соответствии с нормами ИМО MSC.1/Circ.1456 и ГОСТ Р 12.3.047-2021) предполагает значительные капитальные вложения на этапе проектирования и строительства, включая создание огнестойких конструкций, систем дымоудаления и автоматического пожаротушения.

Организация охраны объектов требует интеграции технических средств безопасности:

- многофункциональных систем сигнализации, объединяющих охранные и пожарные контуры;
- средств противодействия террористическим угрозам, включая барьерные ограждения и системы обнаружения взрывчатых веществ.

Эффективность данных мер подтверждается эмпирическими данными: внедрение видеонаблюдения сокращает количество правонарушений на транспортных объектах. Наибольший эффект достигается при использовании интеллектуальных систем видеоаналитики, обеспечивающих распознавание аномального поведения и автоматическое формирование тревожных оповещений.

Безопасность условий размещения грузов и пассажиров напрямую влияет на их сохранность и комфорт. Для пассажиров это включает обеспечение эргономичных зон ожидания с контролем

микроклимата и соблюдением санитарных норм, а для грузов — поддержание параметров хранения в соответствии с классификацией опасных материалов.

Экологическая безопасность характеризуется нагрузкой морского порта на окружающую среду (ОС) (рис. 2). Исходные показатели воздействия на ОС порта представлены в табл. 1.

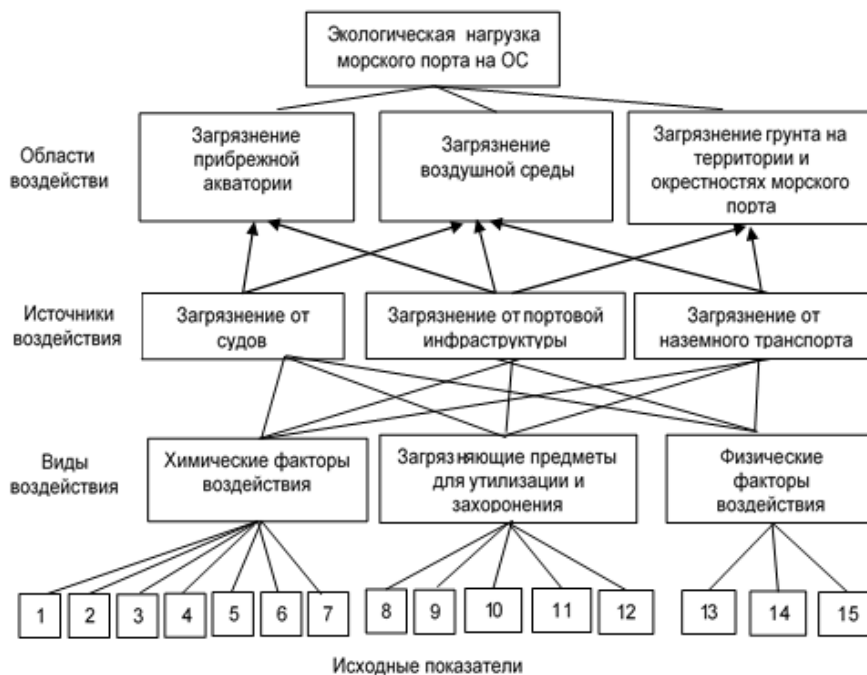


Рис. 2. Экологическая нагрузка морского порта на окружающую среду

Таблица 1
Исходные показатели воздействия на ОС

<i>i</i>	Наименование показателя
1	Выбросы оксидов азота, NO _x
2	Выбросы оксида углерода, CO
3	Выбросы углеводородов, C _n H _m
4	Выбросы серы и ее оксидов
5	Водяной пар и другие парниковые газы
6	Прозрачность выбросов
7	Выбросы прочих вредных веществ, включая тяжелые металлы
8	Горюче-смазочные материалы и прочие жидкие расходные продукты
9	Разлив и остатки жидкого топлива
10	Пыль и фракции твердого топлива (каменного угля)
11	Отходы отработавших нормативный срок эксплуатации деталей, узлов и прочих комплектующих (аккумуляторы, уплотнители, фильтры и пр.)
12	Бытовые отходы (пластиковая упаковка, картон, стекло, пищевые отходы и пр.)
13	Звуковое и вибрационное воздействие
14	Тепловое воздействие
15	Электромагнитное воздействие

Разработанная в статье [12] система комплексной оценки для управления природоохранной деятельностью морского порта, с учетом его вредных воздействий на воздушную среду, прилегающие к порту почвы и прибрежную часть акватории позволяет определять и сгруппировывать основные измеряемые показатели таких воздействий. Сформированы нормативные значения этих показателей. На их основе разработаны порядковые шкалы, позволяющие перевести эти количественные

показатели в соответствующие ранги вредных воздействий. Полученная в результате свертки этих рангов интегральная оценка позволяет сравнивать морские порты по степени вредного воздействия на окружающую среду. Кроме того, такое ранжирование экологичности морского порта облегчает сравнение проектов его модернизации, а также учитывать экологический аспект при комплексном оценивании общих результатов деятельности морского порта [13].

Интеграция выше указанных мер в единую систему управления безопасностью позволяет минимизировать риски и обеспечивает соответствие требованиям международных стандартов (ISO 31000:2018).

Критерии оценки безопасности систем управления движением судна

Безопасность организации управления судном судоходной компанией, определяется [5]:

- безопасностью организационной структуры управления судоходной компанией;
- безопасностью технических средств, обеспечивающих техническое обслуживание (ТО);
- безопасностью технических средств, обеспечивающих управление судном;
- безопасностью персонала судоходной компании.

Эффективность функционирования морского транспортного комплекса (МТК) определяется способностью организационной структуры обеспечивать оперативное принятие решений, непрерывный контроль транспортных процессов и строгую иерархию взаимодействия подразделений. Современные исследования указывают на

несоответствие традиционных моделей управления возрастающей сложности транспортных операций, что связано с недостаточной скоростью сбора, обработки и верификации данных о текущем состоянии флота. Решение этой проблемы достигается интеграцией цифровых технологий, таких как автоматизированные системы мониторинга (AIS, ECDIS) и платформы обмена данными в реальном времени, которые позволяют оперативно решать задачи безопасности судоходства и своевременно передавать критически важную информацию экипажам.

Организационная структура МТК включает специализированные подразделения, обеспечивающие сервисное обслуживание судов в пунктах погрузки и выгрузки (техническое обслуживание, логистическая координация) и аварийно-восстановительные работы в процессе плавания. Надежность этих систем напрямую влияет на безопасность морских операций. Функциональная готовность достигается внедрением интегрированных систем управления, объединяющих данные о геопозиции судна, состоянии механизмов и внешних условиях. Ключевым фактором принятия управленческих решений является достоверная информация, получаемая через бортовые навигационные комплексы (радиолокационные станции, спутниковые системы ГЛОНАСС/GPS) и береговые центры мониторинга, использующие технологии Big Data и искусственного интеллекта для прогнозирования рисков. Особую роль в экстремальных ситуациях играют спутниковые системы коммерческого использования, например, Inmarsat Fleet Xpress, обеспечивающие точность геопозиционирования и передачу параметров, таких как температура грузовых трюмов или уровень остаточной прочности корпуса.

Профессиональная пригодность персонала определяет эффективность использования технического потенциала МТК. В соответствии с резолюцией ИМО MSC.428(98) обязательному психофизиологическому тестированию подлежат все сотрудники, участвующие в судовождении. Современные методики включают оценку стрессоустойчивости, когнитивных функций и анализа служебных обязанностей в контексте типов аварий (столкновения, посадки на мель, разливы грузов). Для минимизации человеческого фактора разрабатываются алгоритмы профилактики аварий, связывающие результаты тестирования с критериями безопасности. Формирование концепции безопасности МТК требует определения параметров соответствия, включая количественные показатели (уровень автоматизации, время реакции на угрозы) и качественные критерии (надежность коммуникаций, обученность экипажа), а также механизмов выявления угроз через распределенные сенсорные сети и системы раннего предупреждения для прогнозирования штормовых условий. Процедуры локализации рисков предусматривают протоколы взаимодействия с аварийно-спасательными службами и алгоритмы принятия решений в условиях неопределенности. Все эти элементы интегрируются в единую систему управления безопасностью (СУБ), соответствующую стандарту ISO 31000:2018, что обеспечивает комплексный подход к минимизации

рисков и повышению устойчивости транспортных процессов.

Таким образом, повышение безопасности МТК достигается синтезом организационных реформ, технологических инноваций и управления человеческим фактором, что требует постоянной адаптации методологий к эволюции транспортных систем и международным нормативным требованиям. Дальнейшие исследования в этой области целесообразно направить на верификацию алгоритмов обработки спутниковых данных в арктических условиях (в рамках Polar Code) и адаптацию стандартов ISO 45001 к психофизиологическим требованиям морских экипажей.

Заключение

Проведенный анализ позволяет констатировать, что морской транспортный комплекс (МТК) представляет собой сложную организационно-техническую систему, включающую морские суда, судоходные пути, портовую инфраструктуру и профессиональные кадры. Её безопасность определяется совокупностью взаимосвязанных компонентов, функционирующих в условиях динамического взаимодействия элементов, иерархической структуры, единой целевой направленности, интенсивных информационных потоков, а также уязвимости к стохастическим внешним воздействиям и способности к самоорганизации.

Установлено, что аварийные и катастрофические ситуации в МТК возникают под влиянием следующих ключевых факторов: экстремальные гидрометеорологические условия; отказы судового оборудования и вспомогательных систем; ошибки персонала портов и судов, а также управленческого состава судоходных компаний; опасные свойства грузов; недостаточная мореходность судов.

Критерии безопасности МТК систематизированы в рамках пяти взаимодополняющих направлений:

- 1. Конструктивная безопасность судов**, охватывающая целостность корпусных конструкций, надёжность энергетических установок, функциональность технологических систем, эффективность информационно-управляющих комплексов и экологическую устойчивость. Её обеспечение достигается применением бортовых систем диагностики, прогнозирования технического состояния и автоматизированных противоаварийных систем.

- 2. Безопасность судовождения**, включающая защиту коммуникаций, сохранность грузов и пассажиров, устойчивость к внешним воздействиям на маршруте следования и обеспечение безопасных условий труда экипажа. Критическими параметрами эффективности выступают точность навигационных систем, уровень автоматизации управления и соответствие критериям устойчивости (СОЛАС, глава II-1).

- 3. Безопасность грузовых операций в портах**, определяемая пожарной безопасностью складских зон, системами защиты от несанкционированного доступа и оптимизацией условий размещения грузов.

- 4. Безопасность окружающей среды**, регулируемая ограничениями на выбросы вредных веществ, предотвращением разливов

нефтепродуктов и минимизацией шумового загрязнения в соответствии с Приложениями к MARPOL 73/78.

5. **Безопасность управления МТК**, зависящая от эффективности организационной структуры судоходных компаний, уровня технического оснащения служб обслуживания и квалификации персонала. Интеграция цифровых платформ (например, систем E-Navigation) позволяет сократить время принятия решений при аварийных сценариях.

Таким образом, обеспечение безопасности МТК требует комплексного подхода, объединяющего инженерные решения, нормативное регулирование и управление человеческим фактором. Перспективные направления дальнейших исследований включают разработку адаптивных моделей прогнозирования рисков с применением искусственного интеллекта, верификацию методов оценки психофизиологической устойчивости экипажей, а также оптимизацию взаимодействия береговых и

судовых систем в условиях арктического судоходства (в рамках Polar Code). Реализация указанных мер позволит повысить устойчивость морской транспортной системы и минимизировать её экологический след в соответствии с глобальной стратегией ИМО по декарбонизации к 2050 году.

Появление новых современных технологий в деятельности МТК – прогрессивный фактор в улучшении экологии на планете, облегчении труда и сохранении здоровья экипажей и сотрудников, обслуживающих морские суда. Вместе с тем появление судов на более экологически чистом топливе, роботизация судовых рабочих операций, внедрение на морских коммуникациях беспилотных судов и т.п. потребует дополнительного времени на создание новой навигационной и портовой инфраструктуры для их эксплуатации – новые терминалы, диспетчерские центры, инженерные и IT-кадры, правового обеспечения и т.д. [11].

Литература

1. Скороходов Д. А., Каминский В. Ю., Стариченков А. Л. Принципы оценки эффективности системы управления безопасностью судоходной компании // Морской вестник. 2018. № 1 (65). С. 105-108.
2. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А. Принципы построения интеллектуальной системы экологической безопасности и навигационного сопровождения мультимодальных перевозок отработавшего ядерного топлива // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 2-1 (60). С. 226-235.
3. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А., Кузнецова Е. Ю. Оценка экологической безопасности водной транспортировки грузов // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3-1 (57). С. 212-219.
4. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А., Стариченков А. Л., Никитин Н. В. Имитационная модель оценки безопасности водного транспорта // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 4-1 (54). С. 20-27.
5. Стариченков А. Л., Лукомский Ю. А., Скороходов Д. А. Принципы оценки эффективности системы управления безопасностью судоходной компании // Морской вестник. 2018. № 1 (65). С. 105-108.
6. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А., Маринов М. Л., Аксёнов В. А. Оценка экологической эффективности судоходной компании // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-1 (52). С. 86-91.
7. Скороходов Д. А., Стариченков А. Л., Каминский В. Ю. Конструктивная безопасность высокоскоростного водного транспорта. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2020. 280 с.
8. Скороходов Д. А., Стариченков А. Л., Степанов И. В. Методологические принципы управления безопасностью региональных транспортных систем. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2019. 271 с.
9. Ермолаев Г. Г., Зотеев Е. С. Основы морского судоходства: Учебник для вузов Минморфлота по специальности «Эксплуатация водного транспорта». 5-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1988. 272 с.
10. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А., Кузнецова Е. Ю., Маринов М. Л. Оценка влияния свойств судна на его экологическую безопасность // Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1. № 2-1 (56). С. 168-173.
11. Малыгин И. Г., Гурлев И. В. Инновационные технологии в развитии морского транспорта // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1-1 (63). С. 41–49.
12. Малыгин И. Г., Еналеев А. К., Цыганов В. В. Система комплексного оценивания для управления природоохранной деятельностью морского порта // Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4-1 (70). С. 159–167.
13. Малыгин И. Г., Цыганов В. В., Еналеев А. К. Комплексное оценивание результата деятельности морского порта // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4-1 (66). С. 225–233.

References

1. Skorokhodov D. A., Kaminsky V. Yu., Starichenkov A. L. Printsipy otsenki effektivnosti sistemy upravleniya bezopasnost'yu sudokhodnoy kompanii [Principles of assessing the effectiveness of shipping company safety management system] // Marine Bulletin. 2018. No. 1 (65). Pp. 105-108.
2. Kaminsky V. Yu., Skorokhodov D. A. Printsipy postroeniya intellektual'noy sistemy ekologicheskoy bezopasnosti i navigatsionnogo soprovozhdeniya mul'timodal'nykh perevozk otrobotavshego yadernogo topliva [Principles of building an intelligent system for environmental safety and navigation support of multimodal spent nuclear fuel transportation] // Marine Intelligent Technologies. 2023. No. 2-1 (60). Pp. 226-235.
3. Kaminsky V. Yu., Skorokhodov D. A., Kuznetsova E. Yu. Otsenka ekologicheskoy bezopasnosti vodnoy transportirovki gruzov [Assessment of environmental safety of water cargo transportation] // Marine Intelligent Technologies. 2022. No. 3-1 (57). Pp. 212-219.
4. Kaminsky V. Yu., Skorokhodov D. A., Starichenkov A. L., Nikitin N. V. Imitatsionnaya model' otsenki bezopasnosti vodnogo transporta [Simulation model for assessing water transport safety] // Marine Intelligent Technologies. 2021. No. 4-1 (54). Pp. 20-27.

5. Starichenkov A. L., Lukomsky Yu. A., Skorokhodov D. A. Printsipy otsenki effektivnosti sistemy upravleniya bezopasnost'yu sudoходной компании [Principles of assessing the effectiveness of a shipping company's safety management system] // Marine Bulletin. 2018. No. 1 (65). Pp. 105-108.
6. Kaminsky V. Yu., Skorokhodov D. A., Marinov M. L., Aksenov V. A. Otsenka ekologicheskoy effektivnosti sudoходной компании [Assessment of environmental efficiency of a shipping company] // Marine Intelligent Technologies. 2021. No. 2-1 (52). Pp. 86-91.
7. Skorokhodov D. A., Starichenkov A. L., Kaminsky V. Yu. Konstruktivnaya bezopasnost' vysokoskorostnogo vodorodnogo transporta // Structural safety of high-speed water transport]. St. Petersburg: Publishing and Polygraphic Association of Higher Educational Institutions, 2020. 280 p.
8. Skorokhodov D. A., Starichenkov A. L., Stepanov I. V. Metodologicheskie printsipy upravleniya bezopasnost'yu regional'nykh transportnykh sistem [Methodological principles of managing the safety of regional transport systems]. St. Petersburg: Publishing and Polygraphic Association of Higher Educational Institutions, 2019. 271 p.
9. Ermolaev G. G., Zoteev E. S. Osnovy morskogo sudovozhdeniya: Uchebnik dlya vuzov Minmorflota po spetsial'nosti «Ekspluatatsiya vodorodnogo transporta» [Fundamentals of marine navigation: Textbook for universities of the Ministry of Maritime Fleet in the specialty "Operation of water transport"]. 5th ed., revised and augmented. Moscow: Transport, 1988. 272 p.
10. Kaminsky V. Yu., Skorokhodov D. A., Kuznetsova E. Yu., Marinov M. L. Otsenka vliyaniya svoystv sudna na ego ekologicheskuyu bezopasnost' [Assessment of the impact of ship properties on its environmental safety] // Marine Intelligent Technologies. 2022. Vol. 1. No. 2-1 (56). Pp. 168-173.
11. Malygin I. G., Gurlev I. V. Innovatsionnye tekhnologii v razvitiі morskogo transporta [Innovative technologies in the development of maritime transport] // Marine Intelligent Technologies. 2024. No. 1-1 (63). Pp. 41–49.
12. Malygin I. G., Enaleev A. K., Tsyganov V. V. Sistema kompleksnogo otsenivaniya dlya upravleniya prirodoоkhrannoy deyatel'nost'yu morskogo porta [Integrated assessment system for environmental management of a seaport] // Marine Intelligent Technologies. 2025. No. 4-1 (70). Pp. 159–167.
13. Malygin I. G., Tsyganov V. V., Enaleev A. K. Kompleksnoe otsenivanie rezul'tata deyatel'nosti morskogo porta [Comprehensive assessment of seaport performance] // Marine Intelligent Technologies. 2024. No. 4-1 (66). Pp. 225–233.

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

Скореходов Дмитрий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор кафедры, e-mail: skorohodda@mail.ru

Dmitriy A. Skorokhodov, professor, Dr. Sci. (Eng), Chief researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: skorohodda@mail.ru

Малыгин Игорь Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, директор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект 149. e-mail: malygin_com@mail.ru

Igor G. Malygin, Dr. Sci. (Eng), Professor, Director, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th Line VO, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; professor of the Department of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia, Moskovsky Prospekt, 149, St. Petersburg, 196105, Russian Federation. e-mail: malygin_com@mail.ru

Каминский Валерий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Valery Yu. Kaminsky, assistant professor, PhD (Eng), Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 26.01.2026.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.02.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 03.02.2026.

Научная статья

УДК: 004.75:004.896:389.112

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.024>**Методы машинного обучения для детектирования ботов в социальных сетях применительно к информационной безопасности водного транспорта**Дюк В.А.¹ v_duke@mail.ru, Каминский В.Ю.¹ Kaminskyvy@yandex.ru,¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. В условиях цифровизации водного транспорта актуализируется задача защиты информационных каналов логистических систем от деструктивного влияния автоматизированных аккаунтов (ботов). В статье представлено исследование, посвященное распознаванию ботов во ВКонтакте с использованием семи алгоритмов машинного обучения: наивного байесовского классификатора, логистической регрессии, многослойного перцептрона, метода опорных векторов, дерева решений J48, алгоритма индукции правил JRip и случайного леса. Анализ выполнен на наборе данных, включающем 5874 профиля и 59 признаков, характеризующих поведение пользователей. Результаты показывают, что случайный лес демонстрирует наивысшую точность (97.25%), тогда как алгоритм JRip обеспечивает сопоставимую эффективность (96.90%) при сохранении полной интерпретируемости правил. Полученные модели могут быть использованы для фильтрации дезинформации в информационных системах водного транспорта, что особенно актуально для оперативного реагирования на чрезвычайные ситуации и оптимизации транспортных маршрутов. Работа представляет практическую ценность для разработки систем кибербезопасности в цифровых экосистемах водного транспорта

Ключевые слова: социальные сети, водный транспорт, детектирование ботов, машинное обучение, информационная безопасность, логистика

Финансирование: работа выполнена в рамках исполнения государственного задания ИГТ РАН № 075-00605-26-00 на 2026 год и плановый период 2027 и 2028 годов за счет средств предоставленной Минобрнауки России субсидии (соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 20.01.2026 № 075-03-2026-498).

Для цитирования: Дюк В.А., Каминский В.Ю. Методы машинного обучения для детектирования ботов в социальных сетях применительно к информационной безопасности водного транспорта, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 230—235. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.024.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.024>**Machine learning methods for detecting bots in social networks in relation to information security of water transport**Vyacheslav A. Duke¹ v_duke@mail.ru, Valery Yu. Kaminsky¹ Kaminskyvy@yandex.ru¹Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences

Abstract. In the context of digitalization of water transport, the task of protecting information channels of logistics systems from the destructive influence of automated accounts (bots) is becoming more urgent. The article presents a study on the recognition of bots in VKontakte using seven machine learning algorithms: naive Bayes classifier, logistic regression, multilayer perceptron, support vector method, J48 decision tree, JRip rule induction algorithm and random forest. The analysis was performed on a dataset including 5874 profiles and 59 features characterizing user behavior. The results show that the random forest demonstrates the highest accuracy (97.25%), while the JRip algorithm provides comparable efficiency (96.90%), while maintaining full interpretability of the rules. The obtained models can be used to filter misinformation in information systems of water transport, which is especially important for rapid response to emergencies and optimization of transport routes. The work is of practical value for the development of cybersecurity systems in digital ecosystems of water transport.

Keywords: social networks, water transport, bot detection, machine learning, information security, logistics.

Financial Support: the work was carried out under the state assignment of the IPT RAS № 075-00605-26-00 for 2026 and the planned period of 2027 and 2028 funded by a subsidy provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement on the provision of subsidies from the federal budget for financial support for the implementation of the state task dated 20 January 2026 № 075-03-2026-498).

For citation: Vyacheslav A. Duke, Valery Yu. Kaminsky, Machine learning methods for detecting bots in social networks in relation to information security of water transport, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 230—235. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.024.

Введение

Работа продолжает исследование, представленное в статье [1], где была обоснована

роль анализа социальных сетей в совершенствовании транспортных систем и повышении безопасности судоходства, а также продемонстрирована возможность использования

данных социальных сетей для оперативного выявления чрезвычайных ситуаций и мониторинга транспортных потоков. Однако возрастающая зависимость водных транспортных систем от открытых источников информации создает новые уязвимости, связанные с деструктивным влиянием автоматизированных аккаунтов.

Современные системы управления водным транспортом интегрируются в цифровые экосистемы, используя данные из социальных сетей для оптимизации логистических маршрутов, мониторинга навигационной обстановки и оперативного реагирования на внештатные ситуации [1]. При этом автоматизированные аккаунты (боты) могут искажать информацию, распространяя дезинформацию о чрезвычайных ситуациях, погодных условиях или изменении условий судоходства. Это создает риски как для экономической эффективности грузоперевозок, так и для безопасности судоходства.

Целью работы является разработка и адаптация методов машинного обучения для детектирования ботов в социальных сетях с возможностью их применения в системах информационной безопасности водного транспорта. Задачи исследования включают:

- сравнение эффективности классических алгоритмов машинного обучения с учетом требований интерпретируемости;
- выявление наиболее информативных признаков поведения пользователей для детектирования автоматизированных аккаунтов;
- анализ возможностей практического применения разработанных моделей для систем информационной безопасности водных транспортных систем.

Экспериментальные данные

Набор данных получен из социальной сети **VK.com** (ВКонтакте) [2] и содержит характеристики 5874 профилей: 2937 – людей, 2937 – ботов. Данные включают как проверенных пользователей, так и специально приобретённые аккаунты ботов, что обеспечивает достоверность разметки. Для каждого профиля извлечено 59 признаков, охватывающих:

- базовую информацию (дата рождения, фото, пол, имя);
- настройки приватности (закрытость профиля, видимость постов);
- коммуникационные возможности (доступ к сообщениям, стене);
- заполненность разделов (интересы, книги, музыка и др.);
- социальные метрики (подписчики, лайки, просмотры, частота постов);
- профессиональную и образовательную информацию;
- характеристики контента (уникальность текста, длина, вложения, хэштеги);
- верификацию и дополнительные параметры (город, сайт, статус).

Обозначения параметров профилей пользователей социальной сети

Ниже приводятся сведения с обозначениями используемых параметров и с расшифровкой этих параметров.

Основная информация

1. `has_domain` – имеет ли пользователь собственный домен/персональную ссылку.
2. `has_birth_date` – указана ли дата рождения.
3. `has_photo` – загружена ли фотография профиля.
4. `gender` – пол пользователя.
5. `has_short_name` – есть ли короткое имя (никнейм).
6. `has_first_name` – указано ли имя.
7. `has_last_name` – указана ли фамилия.
8. `has_nickname` – есть ли псевдоним.
9. `has_maiden_name` – указана ли девичья фамилия (для женщин).

Настройки приватности

10. `access_to_closed_profile` – есть ли доступ к закрытому профилю.
11. `is_profile_closed` – закрыт ли профиль.
12. `all_posts_visible` – видны ли все посты.
13. `is_blacklisted` – находится ли в черном списке.

Контакты и коммуникация

14. `has_mobile` – указан ли мобильный телефон.
15. `can_post_on_wall` – можно ли писать на стене.
16. `can_send_message` – можно ли отправлять сообщения.
17. `can_add_as_friend` – можно ли добавить в друзья.
18. `can_invite_to_group` – можно ли приглашать в группы.

Интересы и активность

19. `has_interests` – указаны ли интересы.
20. `has_books` – указаны любимые книги.
21. `has_tv` – указаны любимые телешоу.
22. `has_quotes` – есть ли цитаты.
23. `has_about` – заполнено ли поле "О себе".
24. `has_games` – указаны игры.
25. `has_movies` – указаны любимые фильмы.
26. `has_activities` – указаны виды деятельности.
27. `has_music` – указана любимая музыка.
28. `audio_available` – доступны ли аудиозаписи.

Социальные показатели

29. `subscribers_count` – количество подписчиков.
30. `posts_count` – количество постов.
31. `avg_likes` – среднее количество лайков.
32. `avg_comments` – среднее количество комментариев.
33. `avg_views` – среднее количество просмотров.
34. `reposts_ratio` – соотношение репостов.
35. `posting_frequency_days` – частота публикаций (в днях).

Профессиональная информация

36. `has_career` – указана ли карьера.
37. `has_military_service` – указана ли военная служба.
38. `has_occupation` – есть ли информация о занятости.
39. `occupation_type_university` – тип занятости: университет.
40. `occupation_type_work` – тип занятости: работа.

Образование

41. `has_universities` – указаны ли университеты.
42. `has_schools` – указаны ли школы.

Личная жизнь

43. `marital_status` – семейное положение.
44. `has_relatives` – указаны ли родственники.
45. `has_hometown` – указан ли родной город.

Контентные характеристики

- 46. links_ratio – соотношение ссылок в контенте.
- 47. hashtags_ratio – соотношение хэштегов.
- 48. avg_keywords – среднее количество ключевых слов.
- 49. avg_text_length – средняя длина текста.
- 50. attachments_ratio – соотношение вложений.
- 51. ads_ratio – соотношение рекламных постов.
- 52. phone_numbers_ratio – соотношение телефонных номеров.
- 53. avg_text_uniqueness – средняя уникальность текста.

Верификация

- 54. is_verified – верифицирован ли аккаунт.
- 55. is_confirmed – подтвержден ли аккаунт.

Дополнительно

- 56. has_website – есть ли веб сайт.
- 57. has_status – установлен ли статус.
- 58. city – город проживания.
- 59. has_personal_data – есть ли персональные данные.

Важной особенностью данных является наличие пропусков, которые могут нести информацию (например, отсутствие поля «дата рождения» у бота). Пропуски сохранены как отдельные категории (значения?), что позволяет алгоритмам корректно их обрабатывать.

Для обучения и тестирования использовано разбиение 66 % / 33 %, то есть 3980 объектов – в обучающей выборке, 1997 – в тестовой (1010 ботов, 987 людей). Такое соотношение обеспечивает статистическую надёжность оценок при сохранении умеренного объёма обучающих данных.

Применяемые методы

В работе использованы алгоритмы, реализованные в пакете WEKA [3] – одной из наиболее распространённых платформ для экспериментального анализа данных. Ниже дается краткая характеристика этих алгоритмов.

Наивный байесовский классификатор (Naive Bayes)

Основан на теореме Байеса при допущении условной независимости признаков [4]. Для числовых признаков используется гауссова аппроксимация, для категориальных – частотное оценивание. Несмотря на упрощения, метод демонстрирует высокую устойчивость на практике [5]. Применён как базовая модель.

Логистическая регрессия

Обобщённая линейная модель с сигмоидной функцией активации:

$$P(y = 1|x) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k)}}.$$

Эта модель позволяет оценивать вклад признаков через коэффициенты β_i [6]. В экспериментах использована L2-регуляризация по умолчанию.

Многослойный перцептрон (MLP)

В классификаторе Multilayer Perceptron WEKA при использовании параметров по умолчанию, при задании 7-ми скрытых слоёв создаётся сеть с архитектурой: входной слой, 7 последовательных скрытых слоёв (где количество нейронов в каждом вычисляется по формуле (число_входных_атрибутов + число_выходных_классов) / 2, округляемое вверх),

и выходной слой. Для обучения используется стохастический градиентный спуск с обратным распространением ошибки и моментом (коэффициент 0.2), с фиксированной скоростью обучения 0.3. Обучение длится максимум 500 эпох (-N 500), но может быть остановлено раньше по критерию ранней остановки: если ошибка на обучающей выборке (так как размер валидационного множества по умолчанию 0, -V 0) не уменьшается в течение 20 эпох (-W 20). Явный размер мини-пакета (batch size) не задаётся, обновление весов происходит после обработки каждого отдельного примера (режим онлайн-обучения) [7]. Данная сеть способна моделировать сложные нелинейные зависимости, но является «чёрным ящиком» с точки зрения интерпретируемости результатов.

Метод опорных векторов (SMO)

Реализация последовательной минимальной оптимизации (SMO) для SVM [8]. Строит гиперплоскость максимального зазора, обеспечивая хорошую обобщающую способность даже в условиях высокой размерности [9].

Дерево решений J48

Реализация алгоритма C4.5 [10], использующая прирост информации с коррекцией на разбиение (gain ratio) и pruning для борьбы с переобучением. Даёт интерпретируемую древовидную структуру решений.

Алгоритм индукции правил JRip

Реализация RIPPER (Repeated Incremental Pruning to Produce Error Reduction) [11]. Строит компактный набор независимых логических правил вида:

(признак₁ = значение₁) $\wedge$... $\wedge$ (признак_k $\leq$ c) $\Rightarrow$ класс.

Правила упорядочены по точности; алгоритм стремится минимизировать их число и длину. Ключевое преимущество – возможность построения экспертно проверяемых гипотез.

Случайный лес (Random Forest)

Ансамбль из 100 деревьев, обученных на бутстрап-выборках с рандомизацией признаков [12]. Обладает высокой устойчивостью и точностью, но низкой интерпретируемостью. Использован как эталонный метод.

Используемые метрики качества

Ввиду сбалансированности классов ($\approx 50/50$) использованы следующие метрики:

Ассигасу (доля, верно, классифицированных объектов)

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN},$$

где TP – истинные боты, TN – истинные люди, FP – ложные тревоги (люди как боты), FN – пропущенные боты.

Точность (Ассигасу) — доля, верно, классифицированных объектов от общего числа объектов (N1/N), выраженная в процентах. Эта метрика принимает значения от 0 до 1 (или от 0% до 100%) и широко используется в задачах бинарной классификации.

Precision (точность), Recall (полнота), F₁-мера

Для класса бот:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP},$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN}$$

$$F_1 = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}$$

В таблицах приведены взвешенные средние (Weighted Avg.) по классам.

Взвешенная F_1 -мера для двух классов – это сводная метрика, которая показывает общее качество модели, автоматически придавая больший вес более крупному классу, что делает ее устойчивой к дисбалансу классов. Формула для взвешенного среднего F_1 : $F_{1\_weighted} = (N_1 \cdot F_{11} + N_2 \cdot F_{12}) / (N_1 + N_2)$, где N_i — количество объектов класса i , F_{1i} — значение F_1 -меры для класса i .

Коэффициент Каппа (Cohen's Kappa)

$$\kappa = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e}$$

где p_o = Accuracy, p_e – вероятность случайного совпадения. Значения:

- $\kappa > 0.8$ – почти полное согласие;
- $\kappa > 0.9$ – почти идеальное.

Вероятность случайного совпадения p_e вычисляется как сумма произведений маргинальных частот: $p_e = [(TP+FN)/N \cdot (TP+FP)/N] + [(FP+TN)/N \cdot (FN+TN)/N]$, где TP, TN, FP, FN — элементы матрицы ошибок, N — общее количество объектов. Коэффициент Каппа вычисляется по формуле: $\kappa = (Accuracy - p_e) / (1 - p_e)$. Значения $\kappa > 0.81$ характеризуются как «почти идеальное» согласие.

AUC-ROC

Площадь под ROC-кривой. Инвариантна к порогу классификации; значение $\rightarrow 1.0$ означает идеальную разделимость.

Результаты экспериментов

Результаты на тестовой выборке (1997 объектов) сведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение моделей на разбиении 66 % / 33 %

Метод	Ассурасу, %	F_1 (взвеш.)	Каппа	AUC-ROC	Интерпретируемость
Naive Bayes	90.89	0.909	0.818	0.943	низкая
Логистическая регрессия	96.75	0.967	0.935	0.990	средняя
MLP (7 слоёв)	96.39	0.964	0.928	0.986	низкая
SMO (SVM)	96.65	0.966	0.933	0.966	низкая
J48 (дерево решений)	96.90	0.969	0.938	0.980	высокая
JRip (правила)	96.90	0.969	0.938	0.980	очень высокая
Random Forest	97.25	0.972	0.945	0.989	низкая

Примечание: полужирным шрифтом выделены максимальные значения.

Наиболее точным оказался случайный лес (Ассурасу = 97.25 %, $\kappa = 0.945$). Однако разница с JRip и J48 составляет менее 0,4 процентных пункта – что в практических задачах часто считается статистически незначимой разницей.

Логические правила для класса «бот» (из JRip)

Наиболее сильные правила:

1. $(has\_status = No) \wedge (has\_occupation = No) \wedge (has\_birth\_date = Yes) \wedge (has\_nickname = No) \Rightarrow$ бот
Поддержка: 2242, ошибок – 20 (ошибка ≈ 0.9 %).

Интерпретация: профиль со скрытым статусом и занятостью, но с датой рождения и без псевдонима – типичен для ботов.

2. $(has\_status = No) \wedge (has\_mobile = Yes) \Rightarrow$ бот

Поддержка: 309, ошибок – 10.
Интерпретация: указание телефона при отсутствии статуса – аномалия, редкая среди людей.

3. $(subscribers\_count \leq 100) \wedge (all\_posts\_visible = Yes) \wedge (posts\_count \geq 5) \Rightarrow$ бот
Поддержка: 50, ошибок – 1.

Интерпретация: низкая популярность при полной открытости и активности – признак массового создания аккаунтов.

Для класса **человек** одно из ключевых правил:

$(subscribers\_count \geq 211) \wedge (reposts\_ratio \leq 0.95) \Rightarrow$ человек.

Таким образом, JRip позволяет сформулировать простые, проверяемые признаки ботов, пригодные

для внедрения даже в системы без ML-движков (например, в виде SQL-фильтров).

Ключевые признаки

Анализ правил и матриц ошибок выделяет наиболее информативные признаки:

- `has_status`, `has_occupation`, `has_birth_date`, `has_nickname`;
- `subscribers_count`, `posting_frequency_days`, `avg_likes`, `reposts_ratio`.

Комбинации этих признаков обеспечивают устойчивую разделимость классов и могут быть использованы для построения простых экспертных правил детектирования ботов. В перспективе такие правила могут быть интегрированы в системы мониторинга транспортных логистических систем для фильтрации недостоверной информации о внешних условиях перевозок.

Заключение

1. Рассмотренные методы демонстрируют высокую эффективность в детектировании автоматизированных аккаунтов: даже базовый наивный байесовский классификатор достигает 90.9% точности, а лучшие методы превышают 96.9%. Это свидетельствует о хорошей разделимости классов в выбранном пространстве признаков.

2. Случайный лес подтверждает статус лидера по точности (97,25%), что согласуется с известными свойствами ансамблей деревьев.

3. Алгоритм JRip обеспечивает практически эквивалентную точность (96.90%) при полной интерпретируемости полученных правил. Это особенно ценно для практического применения, так как полученные логические правила позволяют: формулировать экспертные гипотезы совместно со специалистами; верифицировать результаты детекции; строить «лёгкие» детекторы без зависимости от ML-библиотек.

4. Практическая ценность исследования состоит в том, что выявленные паттерны, такие как отсутствие статуса при наличии даты рождения и скрытой информации о занятости, могут быть непосредственно интегрированы в системы мониторинга как бизнес-правила.

5. Ограничения исследования: не учитывались временные паттерны (суточные/недельные циклы активности); не анализировались графовые признаки (связи, группы, взаимодействия); данные ограничены одной социальной сетью (VK.com).

Представленная работа развивает идеи, заложенные в исследовании [1], где была обоснована роль социальных сетей в обеспечении безопасности водного транспорта. В отличие от предыдущей работы, в данной статье предложен конкретный инструментальный машинного обучения для защиты информационных каналов водных транспортных систем от дезинформации.

Полученные результаты открывают перспективы для практического применения в системах

информационной безопасности водного транспорта. В частности, разработанные методы могут быть интегрированы в системы мониторинга логистических операторов для:

- автоматической фильтрации дезинформации о чрезвычайных ситуациях на водных путях;
- повышения надежности данных, используемых для планирования маршрутов перевозок;
- оперативного выявления координированных кампаний по распространению недостоверной информации о состоянии водных магистралей.

Гибридная стратегия, сочетающая случайный лес для автоматизированного детектирования и JRip для верификации результатов, позволяет достичь оптимального баланса между точностью и интерпретируемостью, что критично для систем принятия решений в транспортной логистике.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение системы на международные социальные платформы, анализ временных и графовых признаков, а также адаптацию методов под специфику конкретных водных транспортных систем с учетом географических особенностей и специфики грузопотоков.

Литература

1. Дюк В. А. Малыгин И.Г. Анализ социальных сетей как инструмент совершенствования транспортных систем и повышения безопасности судоходства // Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 3-1(69). С. 115-120.
2. Zagorskii A. Users vs bots classification [Data set]. – Kaggle, 2025. – DOI: 10.34740/KAGGLE/DS/6999922.
3. Hall M. et al. The WEKA data mining software: an update // ACM SIGKDD explorations newsletter. – 2009. – Т. 11. – №. 1. – С. 10-18.
4. Hart P. E., Stork D. G., Duda R. O. Pattern classification. – Hoboken: Wiley, 2001.
5. Rish I. et al. An empirical study of the naive Bayes classifier // IJCAI 2001 workshop on empirical methods in artificial intelligence. – 2001. – Т. 3. – №. 22. – С. 41-46.
6. Hosmer Jr D. W., Lemeshow S., Sturdivant R. X. Applied logistic regression. – John Wiley & Sons, 2013.
7. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. – MIT Press, 2016. – 800 p.
8. Platt J. Fast training of support vector machines using sequential minimal optimization // Advances in kernel methods. – MIT Press, 1999. – P. 185–208.
9. Cortes C., Vapnik V. Support-vector networks // Machine Learning. – 1995. – Vol. 20. – P. 273–297. – DOI: 10.1007/BF00994018.
10. Quinlan J. R. C4.5: Programs for Machine Learning. – Morgan Kaufmann, 1993. – 302 p.
11. Cohen W. W. Fast effective rule induction // Machine Learning Proceedings. – Elsevier, 1995. – P. 115–123. – DOI: 10.1016/B978-1-55860-377-6.50023-2.
12. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. – 2001. – Vol. 45. – P. 5–32. – DOI: 10.1023/A:1010933404324.

References

1. Duke V. A. Malygin I.G. Analiz sotsial'nykh setey kak instrument sovershenstvovaniya transportnykh sistem i povysheniya bezopasnosti sudokhodstva [Analysis of social networks as a tool for improving transport systems and enhancing shipping safety] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2025. No. 3-1(69). P. 115-120.
2. Zagorskii A. Users vs bots classification [Data set]. – Kaggle, 2025. – DOI: 10.34740/KAGGLE/DS/6999922.
3. Hall M. et al. The WEKA data mining software: an update // ACM SIGKDD explorations newsletter. – 2009. – Vol. 11. – No. 1. – P. 10-18.
4. Hart P. E., Stork D. G., Duda R. O. Pattern classification. – Hoboken: Wiley, 2001.
5. Rish I. et al. An empirical study of the naive Bayes classifier // IJCAI 2001 workshop on empirical methods in artificial intelligence. – 2001. – Vol. 3. – No. 22. – P. 41-46.
6. Hosmer Jr D. W., Lemeshow S., Sturdivant R. X. Applied logistic regression. – John Wiley & Sons, 2013.
7. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. – MIT Press, 2016. – 800 p.
8. Platt J. Fast training of support vector machines using sequential minimal optimization // Advances in kernel methods. – MIT Press, 1999. – P. 185–208.

9. Cortes C., Vapnik V. Support-vector networks // Machine Learning. – 1995. – Vol. 20. – P. 273–297. – DOI: 10.1007/BF00994018.
10. Quinlan J. R. C4.5: Programs for Machine Learning. – Morgan Kaufmann, 1993. – 302 p.
11. Cohen W. W. Fast effective rule induction // Machine Learning Proceedings. – Elsevier, 1995. – P. 115–123. – DOI: 10.1016/B978-1-55860-377-6.50023-2.
12. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. – 2001. – Vol. 45. – P. 5–32. – DOI: 10.1023/A:1010933404324.

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

Дюк Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: v_duke@mail.ru

Vyacheslav A. Duke, professor, Dr. Sci. (Eng), Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 12-th Line VO, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: v_duke@mail.ru

Каминский Валерий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Valery Yu. Kaminsky, assistant professor, Ph.D. (Eng), Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 26.01.2026.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.02.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 03.02.2026.

Научная статья

УДК 621.391.26, 004.627, 932.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.025>

Развитие методологии системного анализа для интеллектуального управления морскими транспортными системами

Бородина О.В.¹ borodinaov@gmail.ru, Шаталова Н.В.¹ shatillan@mail.ru¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. Исходя из общих положений системного анализа, интеллектуализация управления морскими транспортными системами рассматривается как функционирование сложной большой открытой системы, состоящей из трех систем: маршрут; поток судов (судоток); система управления движением судна. Методологическими основами системного анализа является парадигма классификации теоретического аппарата на составляющие: выбор подхода интеллектуального управления и реализация аппарата интеллектуального управления. На высшем уровне реализации морских транспортных систем применяется широкий методологический аппарат, и требуется доказать, что аппарат применим для интеллектуализации системы управления. В работе предложен метод сглаживания функции принадлежности нечеткого множества при выработке решений на заданном пространстве и доказываемость применимости аппарата в интеллектуальных системах управления.

На операционном уровне телемеханики транспортных систем стоит задача выбора инструментария связи IoT устройств. Предложено развивать парадигму реактивного программирования, которая представляет собой метод работы с асинхронным потоком данных на операционном уровне. Данная методология повышает уровень абстракции кода, позволяя разработчикам сосредоточиться на написании фреймворков, как взаимосвязи событий, формирующих логику связи телемеханических устройств.

Ключевые слова: морская транспортная система, системный анализ, интеллектуальное управление, нормализация функции принадлежности, нечеткое множество, реактивное программирование.

Финансирование: Финансирование: работа выполнена в рамках исполнения государственного задания ИПТ РАН № 075-00605-26-00 на 2026 год и плановый период 2027 и 2028 годов за счет средств предоставленной Минобрнауки России субсидии (соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 20.01.2026 № 075-03-2026-498).

Для цитирования: Бородина О.В., Шаталова Н.В. Развитие методологии системного анализа для интеллектуального управления морскими транспортными системами, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 236—243. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.025.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.025>

Development of Systems Analysis Methodology for Intelligent Management of Marine Transportation Systems

Olga V. Borodina¹ borodinaov@gmail.ru, Natalia V. Shatalova¹ shatillan@mail.ru¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Based on the general provisions of systems analysis, the intellectualization of the management of marine transport systems is considered as the functioning of a complex large open system consisting of three systems: route; ship (ship) traffic; ship motion control system. The methodological foundations of system analysis are the paradigm of classifying the theoretical apparatus into its components: the choice of an intelligent control approach and the implementation of an intelligent control apparatus. At the highest level of implementation of marine transport systems, a wide methodological apparatus is used, and it is required to prove that the apparatus is applicable to the intellectualization of the control system. The paper proposes a method for smoothing the fuzzy set membership function when developing solutions in a given space and proves the applicability of the device in intelligent control systems.

At the operational level of telemechanics of transport systems, the task is to select the communication tools of IoT devices. It is proposed to develop a reactive programming paradigm, which is a method of working with asynchronous data flow at the operational level. This methodology increases the level of code abstraction, allowing developers to focus on writing frameworks as the relationship of events that form the communication logic of telemechanical devices.

Keywords: marine transportation system, systems analysis, intelligent management, membership function normalization, fuzzy set, reactive programming.

Financial Support: Financial Support: the work was carried out under the state assignment of the IPT RAS № 075-00605-26-00 for 2026 and the planned period of 2027 and 2028 funded by a subsidy provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement on the provision of subsidies from the federal budget for financial support for the implementation of the state task dated 20 January 2026 № 075-03-2026-498).

For citation: Olga V. Borodina, Natalia V. Shatalova Development of Systems Analysis Methodology for Intelligent Management of Marine Transportation Systems. Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 236—243. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.025.

Введение

Система как совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, образующих целостное единство отличается от простого набора частей. Многие авторы сходятся в определении системы как конечного множества функциональных элементов и отношений между ними, выделенных из среды в рамках определённой цели и времени [1]. Система — это взаимосвязанное множество, отражающее объективное существование конкретных взаимосвязанных объектов, которые могут изменяться во времени [2]. Кроме того, это совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, обладающих четырьмя признаками: элементы, связи, целостность и функция [3]. Таким образом можно говорить, что системы, особенно транспортные, определяются через интегративное свойство, возникающее из отношений элементов [4].

Мастодонтами методов системного анализа по праву признаны такие авторы как Янг Стенли, Стенфорд Оптнер, Э. Квэйд, Ю. И. Черняк и Е. П. Голубков. Обобщённое представление авторов о методах системного анализа отражено в таблице 1.

Разнообразие связей, с точки зрения философии и холистического мировоззрения отражено в современных работах, заключением из анализа данных работ является тот факт, что интеллектуальность системам придают создающиеся в процессе функционирования системы обратные связи, выстроенные по принципу дифференциации.

Таким образом наличие инструмента моделирования связей между подсистемами, связями между элементами и признаками этих элементов играют ключевую роль в формировании архитектуры интеллектуальных транспортных систем.

Выделим важные для отрасли связи в морских транспортных системах в три основные группы:

- характеристические связи, определяющие соотношения между признаками подсистем и элементов, например, зависимость между скоростью и интенсивностью судопотока;
- информационные связи, определяющие пути передачи информации внутри системы;
- управляющие (функциональные) связи или воздействия, генерируемые человеком для достижения какой-либо частной цели [5].

Исходя из общих положений системного анализа интеллектуализация управления морскими транспортными системами, вне зависимости от того, что движение судов осуществляется в морском порту или на открытой воде, можно рассматривать как функционирование сложной большой открытой системы, состоящей из трех систем: маршрут; поток судов (судоток); система управления движением судна (рис. 1, рис. 2).

Обзор работ в области методологии системного анализа, в которых отражены алгоритмы реализации методов моделирования сложных систем демонстрирует факт того, что множество определений в теории порождает многословие и неопределенность в действиях наблюдателя. Если наблюдатель является агентом, моделирующим эту систему, то получается некоторая двусмысленность

в постановке задачи. Вне зависимости от того обратные задачи моделирования решает теория системного анализа или прямые задачи оптимизации, необходим инструмент сглаживания субъективности в видении моделирования системы поведения наблюдателя.

Такой инструмент должен быть удобным в применении к системам автоматизации. В данной работе предлагается метод нормализации нечеткого множества, как инструмент сглаживания субъективности функции принадлежности моделей морских интеллектуальных систем.

Нормализация нечеткого множества

Формирование информационного пространства функционирования интеллектуальной морской транспортной системы остается актуальным в силу сложной динамической и неопределенной информационной составляющей. Одним из исчислений неопределенности, имеющим вероятностную природу и, в то же время, устойчивую теоретическую основу обработки статистических данных является теория вероятностей, и соотношение Байеса, которое позволяет определить меру правдоподобия.

С ростом объемов выборки случайных величин растёт и соответствующая мера правдоподобия. Очевидно также и то, что принятие решений в транспортных системах происходит, как правило, при наличии малых объемов выборки входных случайных величин (изменилась коммерческая загрузка судна, метеоусловия и пр.). В этих условиях нередко прибегают к волевому назначению степеней принадлежности, правдоподобие которых затем оценивается практикой эксплуатации вида транспорта, что подчас несовместимо с безопасностью. Поэтому востребованными оказываются методы определения значений функции принадлежности, не требующие больших объемов указанных выборок, но сохраняющие преимущественно вероятностного их обоснования.

Теория нечетких множеств имеет инструменты построения различных функций принадлежности для нечетких множеств: треугольных, трапецевидных, S-образных, Z-образных, П-образных, сигмоидных. В общем случае функция принадлежности, дискретно заданная нечетким множеством, выглядит так (1):

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}. \quad (1)$$

Кроме того, функция X является также и множеством случайных элементов x_n , и соответствующее ему упорядоченное множество чисел $k \Rightarrow x_i$ (2):

$$X = \{1, 2, \dots, k, x_n\}. \quad (2)$$

Вне зависимости от того какой вид имеет функция принадлежности $\mu_X[k] = \mu_X k$, определяемой субъективно при условии $0 \leq \mu_X k \leq 1$, выражающей степень принадлежности элемента k множеству X и равной субъективной вероятностной оценке значения случайной величины X или случайного элемента $x_i \Rightarrow i$. Иными словами, функция принадлежности $\mu_X k = \mu_X[k]$ – вероятностная оценка, которая может быть традиционно вероятностью и нетрадиционно – отвлечённым положительным вещественным числом, единичное значение

которого соответствует наибольшей вероятности, а нулевое – вероятности, равной нулю.

Таблица

Инструменты системного анализа теории систем разных авторов

Методика системного анализа 1 Стенли Янг	Методика системного анализа 2 Голубков Е.П.	Методика системного анализа 3 Черняк Ю.И.	Методика системного анализа 4 Оптнер С.	Методика системного анализа 5 Квэйд Э.
– определение целей; – выявление проблем для достижения целей; – исследование проблем и постановка диагноза; – поиск решения проблемы; – оценка альтернатив и выбор наилучшей; – согласование решений в организации. – утверждение решения. – подготовка к вводу решения в действие. – управление применением решения. – проверка эффективности решения.	– постановка задачи – исследование – анализ – предварительное суждение – подтверждение – окончательное суждение – реализация принятого решения	– анализ проблемы; – определение системы; – анализ структуры системы; – формулирование цели и критерия достижимости; – декомпозиция цели выявление потребности; – декомпозиция целей. – прогноз будущих условий; – оценка целей в пересчете на текущие ресурсы; – отбор вариантов; – диагноз существующей системы; – построение комплексной программы развития; – проектирование организации для достижения целей.	– идентификация симптомов; – определение актуальности проблемы; – определение цели; – обследование системы и ее дефектных элементов; – определение возможностей; – нахождение альтернатив; – оценка альтернатив; – выбор альтернативы. – составление решения. – признание решения коллективом исполнителей и руководителей. – запуск процесса реализации решения – управление процессом реализации решения. – оценка реализации и ее последствий.	– постановка задачи; – выбор альтернативных путей решения задачи; – исследование ресурсов; – составление модели; – выбор критериев оценки; – сравнение альтернатив и принятие решения.

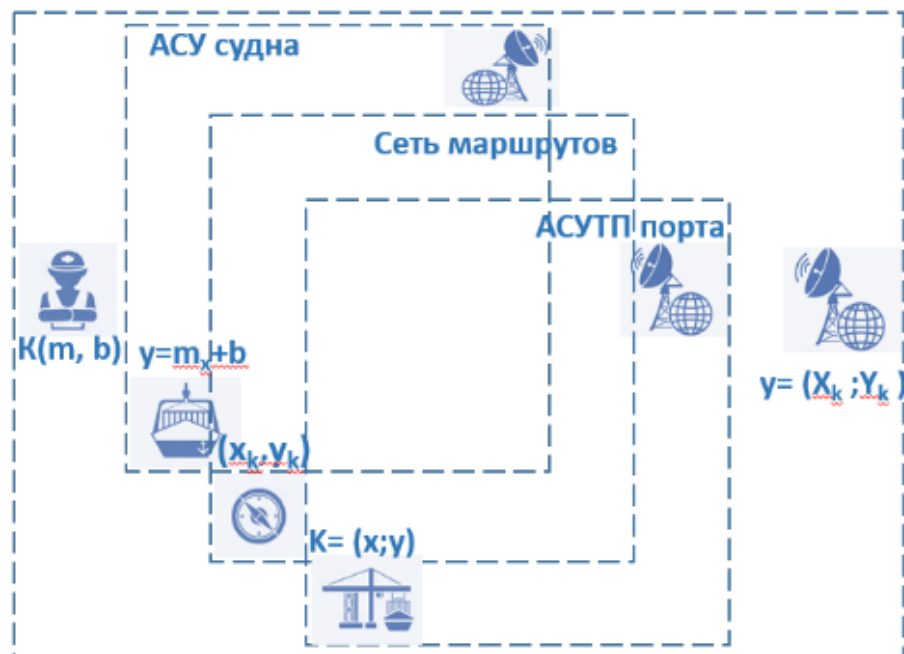


Рис. 1 – Интеллектуальная морская транспортная система
(X, Y – путёвые точки в декартовых координатах: (x_k, y_k) , где $k=1, \dots, n$); K – участки маршрута (фрагменты между соседними путёвыми точками); Y_k – уравнения участков для прямолинейного фрагмента: $y = m_x + b$, где m и b вычисляются по координатам точек)

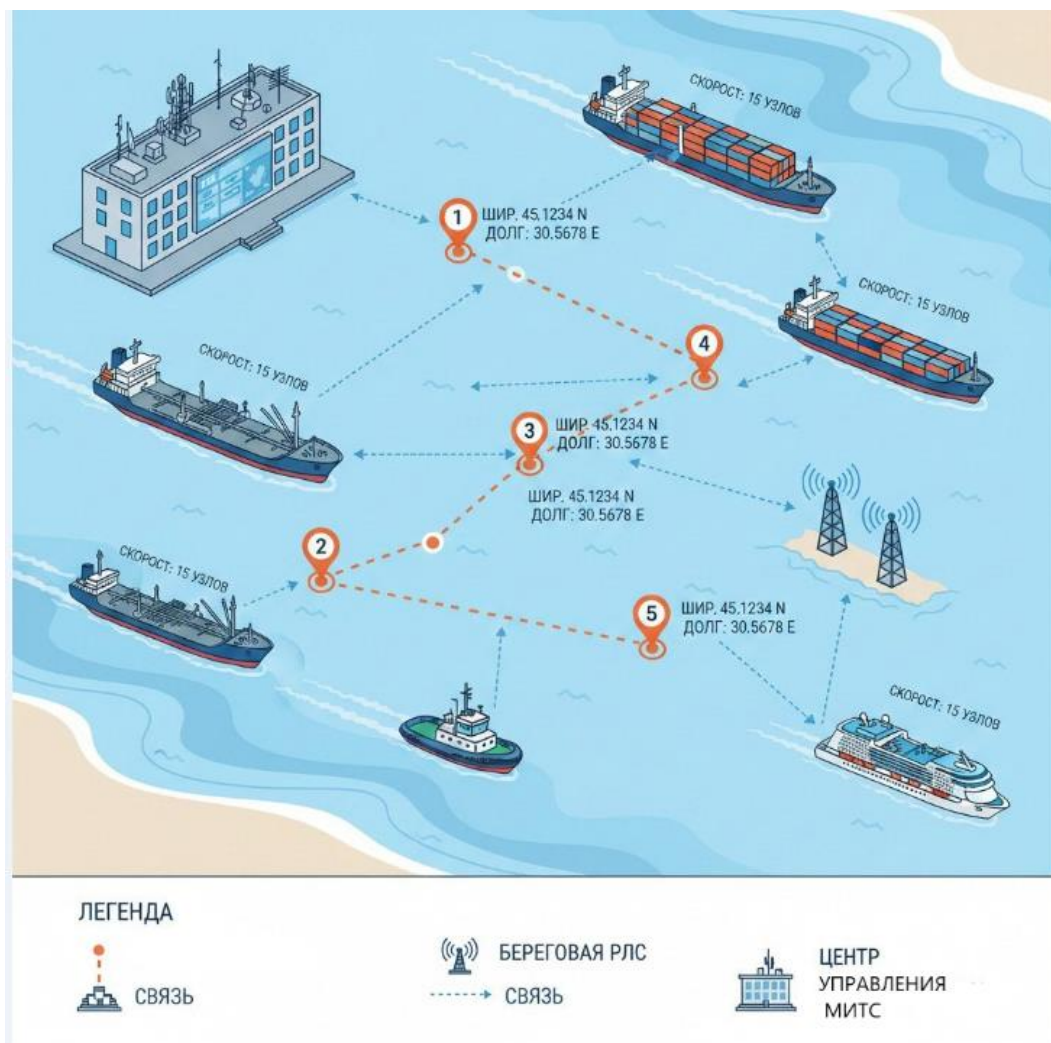


Рис. 2 – Функциональная схема управления морской транспортной системой

$$\sum_{k=1}^n \mu'_{x_k} = 1, \quad (3)$$

причём $0 \leq \mu_{x_k} < 1$ и $\mu_{x[k]}$ – субъективная функция вероятности, т.е. субъективный закон распределения случайной величины X . Так как $\mu_{x_k} = \mu'_{x_k}$, то эта переменная и является субъективной «мерой», вероятностной оценкой в виде вещественного числа в пределах от 0 до 1 (3).

Недостатком метода является получение «вырожденной» разновидности нечёткого множества – случайное множество [8]. Функция принадлежности при этом «вырождается» в объективную функцию вероятности.

Предлагаемый метод определения значений функции принадлежности предполагает оценивание плотности вероятности $f(x)$ случайной величины X по выборке малого объема (2) на основе экспериментальных значений x_i , полученных при соответствующих испытаниях. Причём n настолько мало, что применение классических методов определения закона распределения X не представляется возможным. При малом $n=3 \div 8$ для получения оценки плотности вероятности $f(x)$ возможно использование метода прямоугольных вкладов [9].

Суть метода «прямоугольных вкладов» состоит в использовании некоторой дополнительной

информации относительно неизвестного истинного распределения и учета флуктуационного характера значений случайной величины при построении эмпирической функции распределения [9]. Дополнительная априорная информация о возможной плотности распределения должна характеризовать границы кривой распределения и отсутствие скачков функции в этих пределах.

Если известны только предельные значения $\underline{x}$, $\bar{x}$ и ни одному из возможных значений x в этих пределах нельзя отдать предпочтение по вероятности (4):

$$\tilde{f}(x) = \begin{cases} \frac{1}{\bar{x} - \underline{x}}, & x \in [\underline{x}, \bar{x}], \\ 0, & x \notin [\underline{x}, \bar{x}], \end{cases} \quad (4)$$

то исходное приближение плотности вероятности принимается равным $(\bar{x} - \underline{x})^{-1} = h_0$.

Таким образом, данный подход позволяет уточнить оценку (4) добавлением «прямоугольного» вклада $2d^{-1} = h_1$.

Исчисление «вкладов» от экспериментальных данных можно представить (5), и тогда метод становится удобным для использования в нейросетевом подходе методов машинного обучения.

$$\psi_i(x) = \begin{cases} \frac{1}{2d}, & x \in [x_i - d, x_i + d] \\ 0, & x \notin [x_i - d, x_i + d] \end{cases} \quad (5)$$

где $\psi_i(x)$ назовём вкладом определенного эксперимента.

Суммирование (4) и всех n вкладов (5) даёт искомую оценку плотности вероятности (7):

$$\tilde{f}(x) = a(f_0(x) + \sum_{i=1}^n \psi_i(x)), \quad (6)$$

где $a=(n+1)-1$ – нормирующий множитель, для крайних вкладов между $\psi_1(x)$ и $\psi_n(x)$, выходящих за одну из границ интервала $[x, \bar{x}]$.

Таким образом, любая непрерывная или дискретная случайная величина с неизвестным законом распределения в результате анализа малой выборки может быть представлена соответствующим квантованием нечёткого множества.

Суть метода состоит в использовании некоторой дополнительной информации относительно неизвестного истинного распределения и учете флуктуационного характера значений случайной величины при построении эмпирической функции распределения [9]. Дополнительная априорная информация о возможной плотности распределения привносится в модель вычислений по данному методу экспериментально. С точки зрения расчетов используем функцию прямоугольного вклада.

Алгоритмизация процедура поиска функции принадлежности μ_L нечёткого множества (2) включает следующие шаги в проведении эксперимента для постоянного сбора данных и установлению их области принадлежности с фиксацией в виде решетчатой функции:

- создание небольшое учебной выборки;
- выбор ширины и высоты прямоугольных вкладов;
- определение (исчисление) вкладов;
- построение графа распределения оценки плотности вероятности;
- дискретизация множества;
- фиксация выделенной функции в нечёткое множество (6).

Интерфейсная связь

Помимо фиксации функции принадлежности ряда чисел в эксперименте по сбору данных для интеллектуальной морской транспортной системы важным является и структура связей, интерфейсная структура, которая в свою очередь опирается на ресурсы, необходимые для функционирования сложного объекта. Интерфейсная структура для транспортных систем обеспечивает взаимодействие агентов под заданные цели, в том числе сторонними интерфейсными структурами. Этот факт является причиной успеха транспортных компаний, работающих в одних и тех же корпоративных информационных системах. Например, десять лет назад железнодорожными агентами в РФ наблюдался высокий интерес к продуктам компании SAP, так как этот продукт использовался флагманской компанией.

Интерфейсная структура включает специальные средства и методы, связывающие организационную и техническую структуры в единое целое:

– системы идентификации, сбора, обработки и представления информации о состоянии движущихся по маршрутной сети морских судов;

– системы поиска и представления управляющих решений лиц, принимающих решения;

– средства управления технической структурой (например, автоматизированное рабочее место диспетчера морского порта).

Интерфейсные структуры тесно взаимодействуют между собой посредством потока данных.

Важным критерием интеллектуальной морской транспортной системы, как и любых социально-технических объектов, является устойчивость. Устойчивость в математическом и системном анализе – это свойство решения дифференциального уравнения притягивать к себе другие решения при условии близости начальных данных, обозначающее стабильность системы.

В физике и инженерии понятие «устойчивость» отражает способность сохранять рабочее состояние при внешних воздействиях, возвращаться в равновесное после отклонений во входных параметрах или восстанавливать заданное рабочее состояние системообразующих элементов, сохранять параметры движения или работы [10].

Применительно к транспортно-логистическим системам устойчивостью является возможность посредством внутренних резервов минимизировать затраты или потери при изменениях ресурсов при воздействии внешних или внутренних факторов в различных плоскостях структуры транспортно-логистических систем, таких как скорость, маршрут, время, грузооборот. Устойчивость динамических систем определяется критерием Ляпунова, годографом Найквиста, критерием Михайлова и пр.

Развивающиеся интеллектуальные системы требуют применения нейросетевого подхода и машинного обучения. Надёжными алгоритмами машинного обучения, применяемыми в интеллектуальной транспортной системе следует считать гибридные алгоритмы, объединяющие методы глубокого обучения, такие как LSTM-сети для прогнозирования сбоев, с адаптивными системами управления в реальном времени [10]. В отличие от традиционных статических методов гибридные алгоритмы позволяют увеличивать скорость восстановления информационной системы на 20–30%, кроме того интегрирует блокчейн технологии для обеспечения безопасности данных.

Инновационным аспектом работоспособности интеллектуальной морской транспортной системы является разработка модульной архитектуры с учётом работы в ней IoT компонентов, как ключевых компонентов интеллектуальных морских технических систем. В данной работе предлагается использовать реактивных алгоритм программирования связей в системе.

IoT и реактивное программирование

Интеллектуализация управления морской транспортной системой на операционном уровне представляет собой сеть IoT устройств. Данное направление в стране активно развивается, например, компания Совкомфлот. Разработка технологий автономного управления судами для минимизации влияния человеческого фактора в критических ситуациях. ИИ-системы управляют

судами, используя данные с множественных сенсоров, камер, радаров и спутниковой навигации. Достигнутые результаты: снижение аварийности на море до 90 %, улучшение безопасности морских перевозок, оптимизация расходов на топливо на 12 % благодаря более эффективному управлению судами [6].

Для считывания и сбора данных о направлении движения судна и осях вращения требуется как минимум два датчика: акселерометр и гироскоп. Акселерометр – это датчик, который просто измеряет действующую на него силу ускорения. Гироскоп – это датчик, который немного более совершенен, чем акселерометр, поскольку он может измерять ориентацию и скорость вращения самого себя [7].

Системы телемеханики – особый класс средств автоматизации, предназначенный для контроля и управления удаленными объектами, такими как: технологические объекты на морском флоте, различные портовые сети снабжения, электрические подстанции в морских портах, и логистических системах [11-13]. Важной составной частью любой системы телемеханики является аппарат по настройке сигналов на вход и на выход. Данным аппаратом может стать реактивное статическое программирование.

Реактивное статическое программирование – это парадигма программирования, ориентированная на работу с потоками данных и распространением изменений в этих потоках. Для реактивного алгоритма ключевым объектом являются связи/фреймворки, которые представляют интерактивную программу как композицию двух примитивов: «поведений» и «событий» [12].

В реактивном программировании изменения в потоках данных автоматически распространяются между «подписчиками». «Объекты» реагируют на изменения данных и компонентов, далее измененные «объекты» передаются «наблюдателям», которые подписываются на получение «уведомлений об изменениях».

То есть исследователь системы не кодирует связи, а описывает фреймы между пользователями данных. Один поток является одним видом информации, а один или несколько потоков могут использоваться как входные данные для другого потока, можно объединять два потока или фильтровать поток, выбирая только те события, которые интересны.

Реактивное программирование представляет собой метод работы с асинхронным потоком данных [12], который повышает уровень абстракции кода, позволяя разработчикам сосредотачиваться на написании фреймворков, как взаимосвязи событий, формирующих бизнес-логику.

Современные тенденции теории системного анализа

Обозначенные выше инструменты решений для вычисления параметров модели объекта управления морскими транспортными системами и инструмент соединения набор переменных (реактивный

статический алгоритм) сами по себе не имеют новизны. Однако парадигма повсеместной автоматизации вынуждает развивать те инструменты теории системного анализа, которые облегчают реализацию платформенных решений для работы транспортных систем и повышают легкость получения потоков данных датчиков и измерителей [14-16].

Заключение

Методологические основы системного анализа при управлении транспортными системами служат универсальным каркасом для структурирования сложных исследований. Они позволяют сводить весь комплекс возможных моделей к одному из двух ключевых направлений: во-первых, анализ внешней среды и моделирование транспортных потоков; во-вторых, выстраивание на таких моделях прогнозных показателей эффективности транспортной системы страны в целом. Разные уровни иерархического погружения – от стратегического макроуровня до тактических операционных задач – по обоим направлениям предоставляют исследователям строгий методологический инструментарий для построения математических моделей, адекватно отражающих реальность.

В работе данный постулат был доказан на примере двух конкретных видов моделей: модели нормализации нечеткого множества решений в области интеллектуальной системы морского транспорта и модели, использующей принципы реактивного программирования для решения задач создания динамических интерфейсов интеллектуального управления. Эти примеры иллюстрируют, как методология системного анализа адаптируется к задачам высокой сложности и неопределённости.

Кроме того, в исследовании обосновано, что дальнейшее развитие методологии системного анализа в контексте интеллектуализации морских транспортных систем настоятельно требует систематизации макромоделей управления. Такая систематизация должна охватывать экономические, логистические, экологические и технологические аспекты. Именно комплексное развитие аппарата теории системного анализа, включая методы обработки больших данных, искусственный интеллект и имитационное моделирование, способно преодолеть фрагментарность решений и привести отрасль к качественно новому состоянию – полной интеллектуализации управления. Это подразумевает создание самообучающихся, адаптивных и прогнозирующих систем, где человеческие решения эффективно дополняются и поддерживаются возможностями цифровых моделей, обеспечивающих синергию всех элементов сложной транспортной сети. Таким образом, системный анализ остаётся не просто теоретической базой, а динамично развивающимся практическим инструментом.

Литература

1. Сагатовский В.Н. Уровни свободы и ответственности: системный синтез // Бюллетень сибирской медицины. – 2006. – Т. 5, № 5. – С. 79–81.
2. Казиев В.М. Введение в анализ, синтез и моделирование систем. – М.: ИНТУИТ. – 2016. – 270 с.

3. Ахлибининский Б.В. Информация и система: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора философских наук. (627) / Саратов. гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. – Ленинград: [б. и.], 1969. – 33 с.
4. Агошкова Е.Б. Категория «система» в современном мышлении // Вопросы философии. – 2009. – № 4. – С. 57–71.
5. Тюфанова А.А. О возможности применения системного подхода к проблеме управления движением судов // Технические науки: теория и практика: материалы III Международной научной конференции, Чита, 20–23 апреля 2016 года. – Чита: Молодой ученый, 2016. – С. 118–121.
6. Ассоциация Цифровой транспорт и логистика «Белая книга по «Искусственный интеллект в сфере транспорта и логистики». [Электронный ресурс]. – URL: <https://ict.moscow/static/686177da-7794-5663-9d98-5e9df294aa3d.pdf> (дата обращения: 01.12.2025).
7. Ылдаева М., Карманцева А. Система управления движением автономного транспорта на основе методов машинного обучения // Системный синтез и прикладная синергетика: сборник научных работ XI Всероссийской научной конференции, п. Нижний Архыз, 27 сентября – 01 2022 года. – Ростов-на-Дону, – Таганрог: Южный федеральный университет, 2022. – С. 215–217.
8. Лукомская О.Ю., Лукомский Ю.А. О применении нейросетевых технологий для задач управления проходом судов по шлюзовым системам судопропуска // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2021: материалы Международной научно-практической конференции. – СПб.: ИПТ РАН, 2021. – С. 78–81.
9. Тесленко М.Г., Пермяков В.И. Практическое исследование точности приборов для измерения угла свивания // Отраслевые аспекты технических наук. – 2015. – № 4(46). – С. 17–26.
10. Соколова О.И., Зырянкина К.Э. Методы анализа и синтеза интеллектуальных транспортных систем, их архитектуры и алгоритмов восстановления работоспособности // Интеллектуальный транспорт. – 2025. – Т. 9, № 2(34). – С. 30–42.
11. Прозоровский Е.Е., Редькин Ю.В., Тюфанова А.А. Интеллектуализация информационных сетей с целью увеличения их производительности // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – № 4-1(58). – С. 222–227.
12. Мирошин Д.Ю. Методы асинхронного реактивного программирования // Студенческий вестник: актуальные вопросы науки и образования: сборник студенческих научных работ. – Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2023. – С. 62–68.
13. Елисеев Б.П. Программный паттерн проектирования архитектурного каркаса ModelView-Controller при разработке веб-приложений систем мониторинга спецтранспорта аэропорта // Научный вестник МГТУ ГА. – 2015. – № 220(10). – С. 137–142.
14. Бородина О.В., Шаталова Н.В. Моделирование транспортных потоков в морских интеллектуальных транспортных системах // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 2-1 (68). – С. 267–276.
15. Борисов А.Н., Борисова М.А., Сиек Ю.Л. Структурный и параметрический синтез нейросетевого эмулятора динамики автономного необитаемого подводного аппарата // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2025. – Т. 68, № 1. – С. 5–12.
16. Лукомская О.Ю., Бородина О.В., Шаталова Н.В. Проектирование морских интеллектуальных транспортных систем, опирающихся на показатели устройств обработки информации // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – № 2-1 (64). – С. 232–241.

References

1. Sagatovskij V.N. Urovni svobody i odgovornosti: sistemnyj sintez [Levels of freedom and responsibility: system synthesis] // Byulleten sibirskoj mediciny. – 2006. – Т. 5, № 5. – С. 79–81.
2. Kaziev V.M. Vvedenie v analiz, sintez i modelirovanie system [Introduction to System Analysis, Synthesis, and Modeling]. – М.: INTUIT. – 2016. – 270 с.
3. Ahlibininskij B.V. Informaciya i Sistema [Information and system]: Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora filosofskih nauk (627) / Sarat. gos. un-t im. N. G. Chernyshevskogo. – Leningrad: [b. i.], 1969. – 33 s.
4. Agoshkova E.B. Kategoriya «sistema» v sovremennom myshlenii [The «system» category in modern thinking] // Voprosy filosofii. – 2009. – № 4. – С. 57–71.
5. Tyufanova A.A. O vozmozhnosti primeneniya sistemnogo podhoda k probleme upravleniya dvizheniem sudov [On the possibility of applying a systematic approach to the problem of ship traffic management] // Tehnicheskie nauki: teoriya i praktika: materialy III Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, Chita, 20–23 aprelya 2016 goda. – Chita: Molodoj uchenyj, 2016. – С. 118–121.
6. Associaciya Cifrovoy transport i logistika «Belaya kniga po «Iskusstvennyj intellekt v sfere transporta i logistiki» [Association Digital Transport and Logistics «White Paper on «Artificial Intelligence in the Field of Transport and Logistics»]. [Elektronnyj resurs]. – URL: <https://ict.moscow/static/686177da-7794-5663-9d98-5e9df294aa3d.pdf> (data obrasheniya: 01.12.2025).
7. Yldaeva M., Karmanceva A. Sistema upravleniya dvizheniem avtonomnogo transporta na osnove metodov mashinnogo obucheniya [Autonomous vehicle traffic management system based on machine learning methods] // Sistemnyj sintez i prikladnaya sinergetika: sbornik nauchnyh rabot XI Vserossijskoj nauchnoj konferencii, p. Nizhnij Arhyz, 27 sentyabrya – 01 2022 goda. – Rostov-na-Donu, – Taganrog: Yuzhnyj federalnyj universitet, 2022. – С. 215–217.
8. Lukomskaya O.Yu., Lukomskij Yu.A. O primenenii nejrosetevykh tehnologij dlya zadach upravleniya proходом судов po shlyuzovym sistemam sudopropuska [On the use of neural network technologies for the tasks of controlling the passage of ships through gateway systems of ship passage] // Transport Rossii: problemy i

- perspektivy – 2021: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – SPb.: IPT RAN, 2021. – S. 78–81.
9. Teslenko M.G., Permyakov V.I. Prakticheskoe issledovanie tochnosti priborov dlya izmereniya ugla smachivaniya [Practical study of wetting angle instruments accuracy] // Otrasleyve aspekty tehnikeskikh nauk. – 2015. – № 4(46). – S. 17–26.
 10. Sokolova O.I., Zyryankina K.E. Metody analiza i sinteza intellektualnykh transportnykh sistem, ih arhitektury i algoritmov vosstanovleniya rabotosposobnosti [Methods of analysis and synthesis of intelligent transport systems, their architecture and recovery algorithms] // Intellektualnyj transport. – 2025. – Т. 9, № 2(34). – S. 30–42.
 11. Prozorovskij E.E., Redkin Yu.V., Tyufanova A.A. Intellektualizaciya informacionnyh setej s celyu uvelicheniya ih proizvoditelnosti [Intelligent information networks to improve performance] // Morskie intellektualnye tehnologii. – 2022. – № 4-1(58). – S. 222–227.
 12. Miroshin D.Yu. metody asinhronnogo reaktivnogo programmirovaniya [Asynchronous reactive programming methods] // Studencheskij vestnik: aktualnye voprosy nauki i obrazovaniya: sbornik studencheskikh nauchnykh rabot. – Elec: Eleckij gosudarstvennyj universitet im. I.A. Bunina, 2023. – S. 62–68.
 13. Eliseev B.P. Programmnyj pattern proektirovaniya arhitekturnogo karkasa ModelView-Controller pri razrabotke veb-prilozhenij sistem monitoringa spectransporta aeroporta [Software design pattern of the architectural framework ModelView-Controller when developing web applications for airport special transport monitoring systems] // Nauchnyj vestnik MGTU GA. – 2015. – № 220(10). – S. 137–142.
 14. Borodina O.V., Shatalova N.V. Modelirovanie transportnykh potokov v morskikh intellektualnykh transportnykh sistemah [Simulation of traffic flows in marine intelligent transport systems] // Morskie intellektualnye tehnologii. – 2025. – № 2-1 (68). – S. 267–276.
 15. Borisov A.N., Borisova M.A., Siek Yu.L. Strukturnyj i parametriceskij sintez nejrosetevogo emulyatora dinamiki avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Structural and parametric synthesis of neural network dynamics emulator of autonomous unmanned underwater vehicle] // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Priborostroenie. – 2025. – Т. 68, № 1. – S. 5–12.
 16. Lukomskaya O.Yu., Borodina O.V., Shatalova N.V. Proektirovanie morskikh intellektualnykh transportnykh sistem, opirayushihysya na pokazateli ustrojstv obrabotki informacii [Design of marine intelligent transport systems based on the performance of information processing devices] // Morskie intellektualnye tehnologii. – 2024. – № 2-1 (64). – S. 232–241.

Конфликт интересов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of Interest

Authors' contribution: All authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest

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

Бородина Ольга Владимировна, научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13, e-mail: borodinaov@gmail.ru

Olga V. Borodina, Researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: borodinaov@gmail.ru

Шаталова Наталья Викторовна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: shatillen@mail.ru

Natalia V. Shatalova, Ph.D. (Eng), Lider Researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: shatillen@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 26.01.2026.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 02.02.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 06.02.2026.

Научная статья

УДК 519.673

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.026>

Планирование маршрута перехода судна с учётом ледовой обстановки

Акмайкин Д.А.¹ akmaykin@gmail.com, Гриняк В.М.² victor.grinyak@gmail.com,
Девятисильный А.С.³ devyatis@iacp.dvo.ru, Кузнецов П.А.² petr.kuznetsov@vvsu.ru

¹Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, ²Владивостокский государственный университет, ³Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН

Аннотация. Работа посвящена проблеме безопасного движения судов, маршруты которых полностью или частично проходят через покрытые льдом участки водной поверхности. В статье рассматривается задача планирования маршрута, критерием оптимизации в которой является степень воздействия льда на движущееся судно. При решении задачи принят ряд упрощающих эвристик. Во-первых, множество маршрутов судна описывается взвешенным графом. При построении графа учитывается характер ледового покрова, выделяются участки льда с близкими свойствами. На этих участках маршрут судна носит как правило прямолинейный характер. Во-вторых, характер взаимодействия судна и льда с точки зрения сложности прохождения того или иного участка маршрута описывается относительной шкалой, на основе которой задаются веса рёбер графа возможных маршрутов. Такая модель соответствует особенностям современных источников данных для решения рассматриваемой задачи – информационных сервисов, работающих на основе спутникового мониторинга и предоставляющих данные о ледовой обстановке в табличном или графическом виде. В результате маршрут судна формируется таким образом, чтобы минимизировать движение по покрытым льдом участкам, при этом достигается приемлемая вычислительная сложность алгоритма. В статье приводятся примеры планирования маршрутов судов различных ледовых классов в Восточной Арктике и в Охотском море, подтверждающие возможность решения задачи предложенным способом.

Ключевые слова: безопасность судоходства, планирование маршрута, ледовая обстановка, ледовый класс судна, алгоритмы на графах, кратчайший путь.

Финансирование: Работа выполнена в рамках программы академического стратегического лидерства «Приоритет-2030», проект «Разработка алгоритмов автоматического расхождения судов в соответствии с МППСС-72, оценка их эффективности и безопасности».

Для цитирования: Акмайкин Д.А., Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Кузнецов П.А. Планирование маршрута перехода судна с учётом ледовой обстановки, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 244—252. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.026.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.026>

Ship route planning under ice conditions

Denis A. Akmaykin¹ akmaykin@gmail.com, Victor M. Grinyak² victor.grinyak@gmail.com,
Alexander S. Devyatisilnyi³ devyatis@iacp.dvo.ru, Petr A. Kusnetsov² petr.kuznetsov@vvsu.ru,

¹Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, ²Vladivostok State University, ³Institute of Automation and Control Processes FEBRAS

Abstract. This work addresses the problem of navigation safety for vessels whose routes, fully or partially, pass through ice-covered waters. The paper considers a route planning problem, the optimization criterion for which is the degree of ice impact on a moving vessel. A number of simplifying heuristics are adopted in solving the problem. First, the set of vessel routes is described by a weighted graph. When constructing the graph, the nature of the ice cover is taken into account, identifying ice sections with similar properties. In these sections, the vessel's route is typically straightforward. Second, the nature of the interaction between the vessel and the ice, in terms of the difficulty of navigating a particular section of the route, is described by a relative scale, which is used to assign edge weights to the graph of possible routes. This model corresponds to the characteristics of modern data sources for solving the problem under consideration – information services based on satellite monitoring and providing data on ice conditions in tabular or graphical form. As a result, the vessel's route is designed to minimize movement through ice-covered areas, while achieving acceptable computational complexity of the algorithm. The paper provides examples of route planning for vessels of various ice classes in the Eastern Arctic and the Sea of Okhotsk, confirming the feasibility of solving the problem using the proposed method.

Keywords: navigation safety, route planning, ice conditions, vessel ice class, graph algorithms, shortest path.

Acknowledgments: This work was supported by the program of academic leadership “Prioritet-2030”, project “Development of algorithms for vessels collision avoidance in accordance with COLREGs-72, assessment of their effectiveness and safety”.

For citation: Denis A. Akmaykin, Victor M. Grinyak, Alexander S. Devyatisilnyi, Petr A. Kusnetsov Ship route planning under ice conditions, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 244—252. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.026.

Введение

Планирование маршрута перехода судна является актуальной задачей судовождения [1-3]. Несмотря на то, что основные подходы к её решению хорошо изучены [4-6] и широко используются на практике [7], она постоянно привлекает внимание исследователей. Этот интерес обусловлен сложностью задачи и многообразием условий, в которых осуществляется эксплуатация судов. Существующие методы решения способны учитывать погодные условия, конструктивные характеристики судна и давать варианты возможных маршрутов перехода, оптимизируя длину маршрута, время перехода, расход топлива, экономические затраты на переход и др., интерпретируя все эти параметры с различных точек зрения.

Судоводство в ледовых условиях характеризуется особой сложностью и требует учёта целого ряда факторов, влияющих на безопасность, среди которых основными являются глубины, ограниченность вод, толщина и характер льда, а также общая гидрографическая изученность района [8-10]. В связи с этим используются два подхода к планированию маршрутов судов в ледовых условиях: гидрографический и судоводительский [10]. При гидрографическом подходе маршрут выбирается на основе многолетних ретроспективных данных о состоянии ледового покрова и опыте судоводства в выбранном районе; этот подход позволяет прежде всего оценить осуществимость предполагаемого плавания. При судоводительском подходе выбор маршрута осуществляется на основе реальных оперативных или прогнозируемых данных о погоде и состоянии льда по предполагаемому пути судна. Определяющими факторами при формировании критерия оптимизации для перехода судна в ледовой обстановке становятся условия безопасности [11, 12]. Главной трудностью решения задачи планирования маршрута при этом является модельная интерпретация этих факторов, так как они обусловлены очень сложными физическими явлениями [13] (например, формирование обледенения при волнении, низкой температуре воздуха и высокой температуре воды, воздействие различных видов льда на корпус судна, изменение прочности льда при различных условиях его формирования и текущей погоды и т.п.).

В работе, опубликованной ранее [14], авторами рассматривалась задача планирования маршрута с учетом ледового класса судна и вида льда по ходу его движения. Метод решения задачи был основан на традиционном для такого типа задач упрощении – поиске кратчайшего пути на взвешенном графе. При этом отмечалась высокая вычислительная сложность задачи (что затрудняло её решение при планировании протяжённых маршрутов), обсуждались некоторые подходы к её снижению. *Целью настоящей статьи* является исследование нового метода формирования графа возможных маршрутов судна, описывающего ледовую обстановку. Метод отражает специфику исходных данных о ледовой обстановке, предоставляемых специальными информационными сервисами, и позволяет существенно снизить вычислительную сложность задачи и повысить качество планирования маршрутов.

Материалы и методы

Способность льда препятствовать движению судов определяется множеством его свойств, среди которых основными принято считать толщину, торосистость, сплоченность и возраст [8, 9]. При этом оценка силы и характера взаимодействия льда и судна представляет собой сложную задачу. Несмотря на то, что существуют модели, описывающие физику такого взаимодействия, их непосредственное использование для планирования маршрута вряд ли возможно. Для практических целей способность судна двигаться во льдах принято формализовать (комплексирова эмпирические знания и теоретические представления) набором относительных шкал, к ним относятся сплоченность, возраст, виды льда, а также ледовые классы судов. Например, сплочённость льда описывается 10-уровневой шкалой (балльность льда), для неё также определены понятия «разреженный», «сплоченный», «очень сплоченный» и «сплошной». Возраст льда определяется терминами «однолетний», «двухлетний», «многолетний», чем выше возраст льда – тем он прочнее. Виды льда характеризуют совокупность свойств его толщины и сплоченности: начальный, нилас, молодой, серый, серо-белый, остаточный, старый и др. Ледовые классы судов [15] характеризуют степень усиления корпуса и мощность судна, определяющую способность преодолевать лёд и безопасно двигаться во льдах того или иного вида. В таблице 1 приведена одна из существующих систем ледовой классификации судов. Например, судно класса Ice2 может двигаться непрерывным ходом в разреженном льду толщиной до 0.5 метров, судно класса Arc8 способно непрерывно двигаться в сплоченном льду до 2.1 метров, ледокол класса Icebraker7 может непрерывно продвигаться в сплошном льду толщиной до 1.5 метров и выполнять ледокольные операции в сплошном льду толщиной до 2.0 метров.

Таблица 1

Ледовые классы судов и их примерные свойства (по данным [11])

	Ледовый класс судна	Сплоченность льда	Толщина льда, м
1	Ice1	разреженный	0.4
2	Ice2	разреженный	0.5
3	Ice3	разреженный	0.7
4	Arc4	разреженный	0.8
5	Arc5	разреженный	1.0
6	Arc6	разреженный	1.3
7	Arc7	сплоченный	1.4
8	Arc8	сплоченный	2.1
9	Arc9	сплоченный	3.5
10	Icebraker6	сплошной	1.0 (1.5)
11	Icebraker7	сплошной	1.5 (2.0)
12	Icebraker8	сплошной	2.0 (3.0)
13	Icebraker9	сплошной	2.5 (4.0)

В настоящее время источником информации о ледовой обстановке по ходу движения судна служат специализированные информационные сервисы (например, в нашей стране такие сервисы созданы в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте ААНИИ – <https://www.aari.ru>), агрегирующие данные спутникового мониторинга, донесений судов и полярных станций. Данные могут предоставляться в виде таблицы, набора записей или сводном графическом виде. Указанные информационные сервисы активно развиваются в связи созданием цифровой экосистемы Северного морского пути [10].

Введём систему координат x, y , где x соответствует географической долготе, а y – географической широте. Пусть судно движется по траектории, описываемой кривой q , в каждой точке которой задана функция $u(x, y)$ – степень воздействия льда на судно. Общее воздействие льда на судно при его движении вдоль кривой q можно описать криволинейным интегралом первого рода:

$$U = \int_q u(x, y) dq.$$

Оптимальным маршрутом судна является кривая q_* , обеспечивающая минимум функционала U .

Хотя кривую q_* возможно определить непосредственно, используя для этого методы вариационного исчисления и динамического программирования, к этому редко прибегают на

практике из-за высокой вычислительной сложности задачи и дискретности сетки функции $u(x, y)$ [5, 6]. Чаще всего кривую q_* определяют исходя из некоторой эвристики, получая при этом решение не оптимальное в строгом смысле, но пригодное для практики. Одним из таких популярных упрощений исходной задачи является её интерпретация поиском кратчайшего пути на взвешенном графе. В работе [14] для построения такого графа возможных маршрутов использовалась регулярная сетка вершин и рёбер. Наряду с ростом вычислительной сложности задачи для протяжённых маршрутов это приводило также к их «изломанности». В настоящей работе предлагается уменьшить число вершин и рёбер графа возможных маршрутов путём выделения областей (кластеров) с близкими значениями функции $u(x, y)$ (то есть с близкими свойствами льда) и исключения из графа «лишних» вершин и рёбер, лежащих внутри этих областей.

Рассмотрим пример, иллюстрирующий идею построения графа возможных маршрутов судна на акватории с ледовым покровом. На рисунке 1 цветом выделены пять областей: 1, 2 и 3 – это области с ледовым покровом разного характера (например, сплочённый, разрежённый и сплошной); внутри одной области лёд обладает близкими характеристиками воздействия на судно, 4 – область открытой воды, 5 – область, запрещённая для плавания (например, суша).

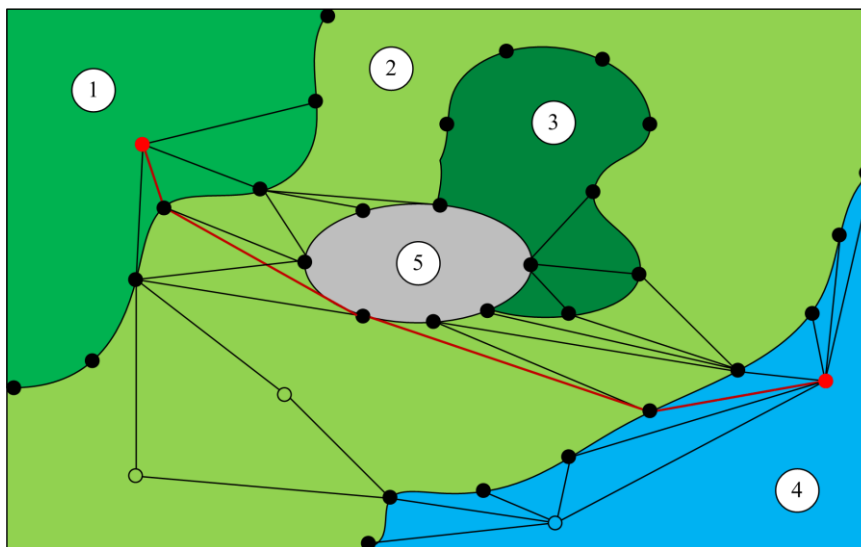


Рис. 1. Способ построения графа возможных маршрутов судна

Формирование множества вершин графа. Зададим некоторую величину α , характеризующую расстояние между вершинами графа. «Расставим» вершины так, чтобы они находились на границах областей, а расстояние между ними по границе было случайной величиной, определяемой как $\alpha \pm 0.2\alpha \cdot \varepsilon$, где ε – случайная величина, равномерно распределённая на отрезке $[0, 1]$ (чёрные точки на рис. 1). Другими словами, α – это среднее расстояние между точками, лежащими на границах областей, при этом расстояние задаётся не «жёстко», а с «допуском» в 20%; это делается для того, чтобы было удобнее размещать точки, располагая их на

пересечениях, вершинах и перегибах границ областей.

Зададим некоторую величину β , характеризующую максимальная длина ребра, соединяющего «чёрные» точки одной области (поскольку «чёрные» точки лежат на границах областей, считается, что они принадлежат двум или нескольким областям). Если для некоторой области найдется пара «чёрных» точек, расстояние между которыми больше, чем β , добавим внутрь области точки, так, чтобы можно было соединить точки пары отрезками длины меньше β («выколотые» точки на рисунке 1, для примера показана одна такая точка в области 4 и две в области 2). Такие «выколотые»

точки располагаются случайным образом, их координаты подбираются так, чтобы минимизировать их число. «Выколотые» точки включаются в множество вершин графа.

Наконец, добавим в множество вершин графа точки начала и конца маршрута (красные точки на рисунке 1).

Формирование множества ребер графа. Соединим точки начала и конца маршрута отрезками со всеми точками своей области. В остальных областях соединим отрезками вершины, принадлежащие одной области, по принципу «каждая с каждой». При этом, во-первых, ограничим длину ребра величиной β и, во-вторых, оставим только те ребра, которые полностью лежат в области инцидентных им вершин (то есть не пересекают других областей). Далеко расположенные «чёрные» вершины соединятся друг с другом через «выколотые» вершины. Таким образом, будет образован связный граф, большинство вершин которого лежит на границах областей, а ребра – внутри областей. В областях, запрещённых для плавания, ребра не формируются (как внутри области 5 на рисунке 1). Смысл такого способа построения графа возможных маршрутов состоит в том, чтобы внутри области судно двигалось как правило одним и тем же курсом, его изменение происходило бы преимущественно на границах областей – при переходе из одной области в другую. Это позволит получить граф с существенно сниженным числом вершин и рёбер по сравнению с регулярной сеткой. На схематическом примере построения графа (рисунок 1) для наглядности показаны не все его ребра.

О выделении областей и задании веса рёбер графа. Функция $u(x, y)$, оценивающая степень воздействия льда на судно при его движении, зависит от совокупности параметров льда и судна. Как уже было отмечено, из-за сложности физических явлений, происходящих при взаимодействии корпуса судна и ледового покрова, количественное описание этого процесса затруднено, поэтому в рассматриваемой задаче функцию $u(x, y)$ удобнее представить относительной безразмерной шкалой. Если такая шкала задаётся непрерывно, то область значений функции $u(x, y)$ можно разбить на характерные участки (кластеры), внутри которых значения $u(x, y)$ считаются постоянными (например, средними, или средневзвешенными для выделенного участка области значений). Однако чаще всего относительную шкалу функции $u(x, y)$ удобнее задавать дискретно, как следствие дискретности представления данных о ледовой обстановке. Так, информационные сервисы ААНИИ предоставляют информацию о сплоченности, возрастном составе льда и некоторых других его свойствах, имеющих значение для судоводителей, соотнося их с принятой номенклатурой льда [16]. В этом случае функция $u(x, y)$ коррелирует с картой ледовой обстановки, давая картину, похожую на показанную на рисунке 1. Малые значения функции $u(x, y)$ означают «лёгкость» плавания, например, на открытой воде или в начальных видах льда. Большие – «затруднённость» движения. В таблице 2 приведён пример значений функции $u(x, y)$ в зависимости от вида льда и ледового класса судна. Так, для судов

класса Arc5 плавание допустимо лишь в тонких однолетних льдах, поэтому для более тяжёлых видов льда значения функции $u(x, y)$ равны бесконечности, ребра, лежащие в этих областях, исключаются из графа возможных маршрутов. Судна класса Icebraker7 и выше способны плавать во всех перечисленных видах льда.

Таблица 2

Возможные значения функции $u(x, y)$ для судов ледовых классов Arc5 и Icebraker7

Вид льда	$u(x, y)$ для Arc5	$u(x, y)$ для Icebraker7 и выше
Открытая вода	1	1
Начальные виды	3	3
Нилас	5	5
Серый	10	8
Молодой	15	10
Серо-белый	25	13
Тонкий	30	15
Однолетний	∞	20
Средний	∞	25
Толстый	∞	30
Старый	∞	35

Значения функции $u(x, y)$ задаются в основном экспертным способом. Возможна также оценка значений $u(x, y)$ на основе ретроспективных данных о движении судов во льдах различного типа. Вес ребра графа, соединяющего точки p_i и p_j задаётся согласно формуле:

$$d_{ij} = u(x, y)r(p_i, p_j),$$

где x, y – координаты любой точки ребра (кроме начала и конца), $r(p_i, p_j)$ – функция расстояния между точками, зависящая от принятой модели поверхности Земли. В рассматриваемой задаче в качестве $r(p_i, p_j)$ удобно взять расстояние между точками на поверхности шара среднего земного радиуса по дуге Большого круга.

Таким образом, получим разреженный неориентированный взвешенный граф возможных маршрутов судна. Поиск кратчайшего пути на нём может осуществляться известными детерминированными методами (Дейксты, Беллмана-Форда, A^* и др.). Сравнительно небольшое число вершин и рёбер графа даёт возможность решения задачи современными программными и вычислительными средствами общего назначения.

Результаты

Ниже представлены некоторые примеры расчетов маршрутов судов по данным о ледовой обстановке, полученным с портала <https://www.aari.ru>. Функция $u(x, y)$ задавалась относительной шкалой с коэффициентами, приведёнными в таблице 2. Граф возможных

маршрутов строился со значениями $\alpha = 5$ км, $\beta = 300$ км.

На рисунке 2 показан маршрут перехода судна класса Arc5 из порта Певек до Берингова пролива (жирная красная линия). После выхода из Певека судно идёт на северо-восток для обхода участка старого льда, затем поворачивает на восток и проходит примерно посередине пролива между о. Врангеля и материком. Далее следует через участок открытой воды и молодого льда, дойдя до следующего участка открытой воды поворачивает на юг. Согласно найденного маршрута, судно обходит непроходимые для него участки старого льда, одновременно минимизируя расстояние, проходимое через участки молодого льда.

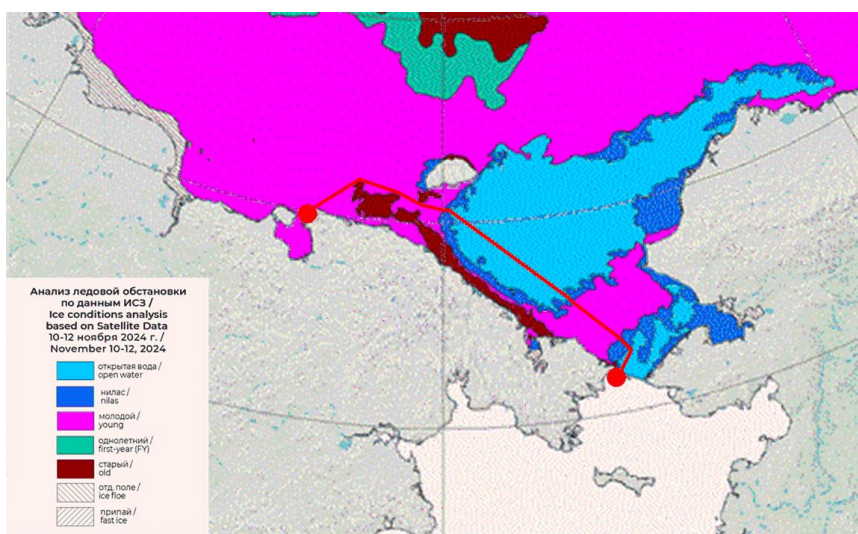


Рис. 2. Результаты планирования маршрута «Певек – Берингов пролив»

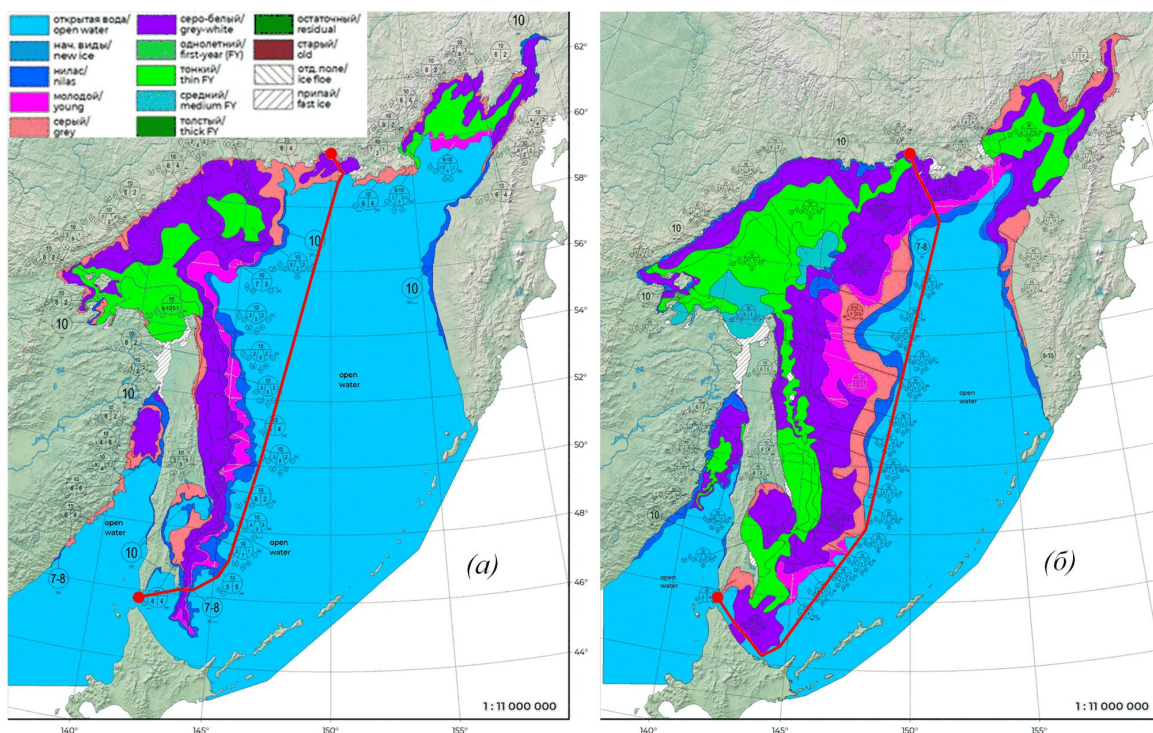


Рис. 3. Результаты планирования маршрута «пролив Лаперуза-Магадан»

Из рисунков 2 и 3 видно, что планируемый описанным методом маршрут судна как правило

На рисунке 3 показаны маршруты перехода судна класса Icebreaker7 от пролива Лаперуза в порт Магадан в январе (рис. 3а) и феврале (рис. 3б). При плавании в январе судно движется на восток, проходя участок молодого льда в самом узком месте и затем поворачивает на северо-восток, двигаясь вдоль кромки льда в зоне открытой воды. Подходя к Магадану судно преодолевает небольшой участок серо-белого льда. При плавании в феврале судно идёт на юго-восток, стараясь минимизировать проходимый участок серо-белого льда, далее следует вдоль кромки льда и на подходе к Магадану входит в ледовое поле так, чтобы минимизировать пройденное через него расстояние.

представляет собой ломаную с относительно небольшим числом отрезков большой длины

(например, маршрут на рисунке 3б – самый длинный из приведённых – состоит из 17 отрезков). Это не только снижает вычислительную сложность задачи, но и делает такой маршрут удобным для реализации на практике, оптимизируя работу средств управления судном.

Обсуждение

Из множества известных подходов к решению оптимизационной задачи планирования маршрута в настоящее время с лучшей стороны зарекомендовали себя алгоритмы эвристического типа. Они не дают оптимального решения, однако позволяют стандартными вычислительными средствами найти решение, пригодное для практики. Суть проблемы в том, что условия вдоль маршрута судна могут изменяться со временем, поэтому даже точно найденное решение в любом случае будет давать лишь приближённый, «кусочно-оптимальный» маршрут. Хотя ледовая обстановка меняется не слишком быстро по отношению к характерному времени нахождения судна на маршруте и периоду обновления данных [17, 18], в рассматриваемой задаче этот фактор тоже имеет место. Таким образом приближенный подход, основанный на обращении к дискретным структурам здесь вполне оправдан. Это подтверждается и результатами известных исследований в рассматриваемой предметной области [19–22].

Граф возможных маршрутов судна формируется с учетом параметров α (характерного расстояния между вершинами графа, лежащими на границах областей) и β (максимальной длины ребра). Эти параметры определяют общее число вершин и ребер в графе, и, соответственно, вычислительную сложность задачи поиска пути на взвешенном графе и число отрезков в найденном маршруте. Выбор значений α и β вряд ли возможно формализовать, они подбираются опытным путём, при моделировании задачи на данных прошлых периодов и неформальной оценке качества найденных маршрутов, характерных для выбранной акватории.

Для выделения областей акватории с близкими свойствами льда можно прибегнуть к алгоритмам кластеризации, задав метрику такой близости. В рассматриваемой задаче хорошие результаты может дать алгоритм DBSCAN, выделяющий области связности и не требующий предварительного задания числа кластеров. Параметры алгоритма

могут быть подобраны интуитивно при кластеризации ретроспективных данных о ледовой обстановке.

Функция степени воздействия льда на судно $u(x, y)$ может быть задана экспертным путём. Ещё один возможный способ её формирования – обращение к ретроспективным данным о движении судов в ледовых условиях с анализом скорости их движения (чем ниже скорость – тем больше значение $u(x, y)$ для конкретных видов льда и ледового класса судна). В этом случае можно задать $u(x, y)$ обратной зависимостью (линейной или экспоненциальной) от скорости или более сложной функцией, обратившись к методам нечетких систем.

Предложенный в работе метод планирования маршрутов судов в ледовых условиях может использоваться для поддержки принятия решений судоводителями или быть реализован в системах автоматизации управления судном. В перспективе он может быть востребован и в свете развития автономного судовождения [23, 24].

Заключение

В ходе работы был разработан метод планирования маршрутов судов, проходящих через акватории с ледовым покровом. Решение этой задачи связано с оптимизацией по ряду возможных критериев. В настоящей работе предложен критерий оптимизации по степени воздействия льда на судно при его прохождении по маршруту, то есть максимизации безопасности движения.

Метод решения задачи использует традиционное для планирования маршрутов судов упрощение – представление множества маршрутов в виде взвешенного графа и поиск кратчайшего пути на этом графе. Вес ребер графа зависит от вида льда и ледового класса судна. В работе предложен оригинальный способ построения такого графа возможных маршрутов, существенно уменьшающий число его вершин и ребер по сравнению с существующими подходами.

В статье представлен пример планирования маршрутов судов с использованием реальных данных о ледовой обстановке в районе Охотского моря и Восточной Арктики. Результаты расчетов подтвердили применимость предложенного метода при использовании данных о состоянии ледового покрова, предоставляемых специализированными информационными сервисами.

Литература

1. Kuhlemann S., Tierney K. A genetic algorithm for finding realistic sea routes considering the weather. *Journal of Heuristics*. 2020;26:801–825. DOI: 10.1007/s10732-020-09449-7.
2. Акмайкин Д.А., Букин О.А., Гриняк В.М., Москаленко М.А. Планирование маршрута перехода судна с учётом опасности морского волнения. 2018;(4-5):148–152.
3. Долгов А.А. Планирование маршрутов для морских автономных надводных судов. *Эксплуатация морского транспорта*. 2024;(1);3–8. DOI 10.34046/aumsuomtl10/1.
4. Веремей Е.И., Сотникова М.В. Алгоритмы оптимизации маршрутов движения с учетом погодных условий. *International Journal of Open Information Technologies*. 2016;4(3):55–61.
5. Сотникова М.В. Алгоритмы формирования маршрутов движения судов с учетом прогноза погодных условий. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 2009;(2):181–196.
6. Wang H.B., Li X.B., Li P.F., Veremey E.I., Sotnikova M.V. Application of real-coded genetic algorithm in ship weather routing. *Journal of Navigation*. 2018;71(4):989–1010. DOI: 10.1017/S0373463318000048.
7. Акмайкин Д.А., Хоменко Д.Б., Ключева С.Ф. Обзор функциональных возможностей и перспективы современных автоматизированных систем планирования маршрута судна. *Вестник государственного*

- университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2017;9(2): 237–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-237-251.
8. Андреева Е.В. Многокритериальный подход в задаче выбора оптимальных маршрутов в акватории Северного морского пути. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2021;13(3):399–408. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-399-408.
 9. Алёшин А.А., Кубрин С.С. Функциональная схема оперативного расчета оптимального маршрута судна в ледовых условиях. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2021;13(2):222–231. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-222-231.
 10. Андреева Е.В., Тезиков А.Л. Поиск оптимальных судоходных маршрутов в акватории арктических морей. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2023;15(2):191–199. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-191-199.
 11. Алёшин А.А., Кубрин С.С. Применение метода оптимизации маршрута судна в ледовых условиях с точки зрения системы управления безопасностью. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 22;14(4):546–554. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-546-554.
 12. Андреева Е.В., Тезиков А.Л. Формализация показателя стесненности акватории Северного морского пути. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2022;14(1):55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-55-62.
 13. Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Блинов К.Д. Определение сопротивления сплошного льда движению ледокола с помощью модельного эксперимента. Морские интеллектуальные технологии. 2024;(3-1):23–29. DOI: 10.37220/MIT.2024.653.019.
 14. Гриняк В.М., Акмайкин Д.А., Иваненко Ю.С. Планирование маршрута перехода судна с учетом параметров ледовой обстановки. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2022;10(3):20–21. DOI: 10.26102/2310-6018/2022.38.3.006.
 15. Правила классификации и постройки морских судов. Часть 1. Классификация. Российский морской регистр судоходства. НД № 2-020101-138: СПб, 2021.
 16. Афанасьева Е.В., Алексеева Т.А., Соколова Ю.В. и др. Методика составления ледовых карт ААНИИ. Российская Арктика. 2019;7:5–20. DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10071.
 17. Гриняк В.М., Акмайкин Д.А., Девятисильный А.С. Оценка перспектив использования данных метеоспутников для планирования маршрута судна в арктических водах. Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2019;11(2):209–221. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-209-221.
 18. Гриняк В.М., Акмайкин Д.А., Иваненко Ю.С. Исследование реализуемости планирования оптимального маршрута судна с учетом спутниковых метеоданных. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2017;(2):20–21.
 19. Huang Y., Sun C., Sun J., Song Z. Route Planning of a Polar Cruise Ship Based on the Experimental Prediction of Propulsion Performance in Ice. Journal of Marine Science and Engineering. 2023;11:1655. DOI: 10.3390/jmse11091655.
 20. Lee H., Roh M.-I., Kim K.-S. Ship route planning in Arctic Ocean based on POLARIS. Ocean Engineering. 2021;234:109297. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109297.
 21. Topaj A., Tarovik O., Bakharev A., Kondratenko A. Optimal ice routing of a ship with icebreaker assistance. Applied Ocean Research. 2019;86:177–187. DOI: 10.1016/j.apor.2019.02.021.
 22. Shu Y., Zhu Y., Xu F., et al. Path planning for ships assisted by the icebreaker in ice-covered waters in the Northern Sea Route based on optimal control. Ocean Engineering. 2023;267:113182. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113182.
 23. Gongxing W., Incecik A., Tezdogan T., et al. Long-voyage route planning method based on multi-scale visibility graph for autonomous ships. Ocean Engineering. 2021;219:108242. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108242.
 24. Москаленко М.А., Черняхович С.Е., Пушкарев И.И., Титов А.В. Технологии автономного судоходства, тенденции и перспективы. Морские интеллектуальные технологии. 2023;(1-1):18–28. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.001.

References

1. Kuhlemann S., Tierney K. A genetic algorithm for finding realistic sea routes considering the weather. Journal of Heuristics. 2020;26:801–825. DOI: 10.1007/s10732-020-09449-7.
2. Akmaykin D.A., Bukin O.A., Grinyak V.M., Moskalenko M.A. Planning vessel transition route taking into account danger from sea waves. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2018;(4-5):148–152.
3. Dolgov A.A. Route planning for marine autonomous surface vessels. Exploatacia morskogo transporta. 2024;(1):3–8. DOI: 10.34046/aumsuomtl10/1.
4. Veremey E.I., Sotnikova M.V. Optimization algorithms for navigation routes accounting for weather conditions. International Journal of Open Information Technologies. 2016;4(3):55–61.
5. Sotnikova M.V. Algorithms for forming ship navigation routes taking into account weather forecast. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 10. Prikladnaya matematika. Informatika. Processy upravleniya. 2009;(2):181–196.
6. Wang H.B., Li X.B., Li P.F., Veremey E.I., Sotnikova M.V. Application of real-coded genetic algorithm in ship weather routing. Journal of Navigation. 2018;71(4):989–1010. DOI: 10.1017/S0373463318000048.

7. Akmaykin D.A., Khomenko D.B., Klyueva S.F. Review of functional capabilities and prospects of modern automated systems for vessel route planning. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2017;9(2):237–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-237-251.
8. Andreeva E.V. Multicriteria approach to choosing optimal routes in the North Sea Route area. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2021;13(3):399–408. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-399-408.
9. Aleshin A.A., Kubrin S.S. Functional scheme for operational calculation of an optimal ship route in ice conditions. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2021;13(2):222–231. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-222-231.
10. Andreeva E.V., Tezikov A.L. Searching for optimal shipping routes in the Arctic seas area. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2023;15(2):191–199. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-191-199.
11. Aleshin A.A., Kubrin S.S. Applying optimization methods for ship route planning in ice conditions regarding safety management system requirements. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2022;14(4):546–554. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-546-554.
12. Andreeva E.V., Tezikov A.L. Formulation of congestion indicator for the Northern Sea Route area. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2022;14(1):55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-55-62.
13. Gramuzov E.M., Kalinina N.V., Blinov K.D. Determination of solid ice resistance to icebreaker motion using model experiment. Marine Intellectual Technologies. 2024;(3-1):23–29. DOI: 10.37220/MIT.2024.653.019.
14. Grinyak V.M., Akmaykin D.A., Ivanenko Yu.S. Planning ship's transition route considering parameters of ice situation. Modelirovanie optimizatsiya informatsionnyye tehnologii. 2022;10(3):20–21. DOI: 10.26102/2310-6018/2022.38.3.006.
15. Rules for classification and construction of seagoing ships. Part 1. Classification. Russian Maritime Register of Shipping. ND No. 2-020101-138: St Petersburg, 2021.
16. Afanas'eva E.V., Alekseyeva T.A., Sokolova Yu.V. et al. Methodology for compiling ice maps at the Arctic and Antarctic Research Institute. Rossiyskaya Arktika. 2019;7:5–20. DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10071.
17. Grinyak V.M., Akmaykin D.A., Devyatitsil'nyy A.S. Assessment of meteorological satellite data usage potential for ship route planning in arctic waters. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2019;11(2):209–221. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-209-221.
18. Grinyak V.M., Akmaykin D.A., Ivanenko Yu.S. Study of feasibility of optimal ship route planning considering satellite meteorological data. Modelirovanie optimizatsiya informatsionnyye tehnologii. 2017;(2):20–21.
19. Huang Y., Sun C., Sun J., Song Z. Route Planning of a Polar Cruise Ship Based on the Experimental Prediction of Propulsion Performance in Ice. Journal of Marine Science and Engineering. 2023;11:1655. DOI: 10.3390/jmse11091655.
20. Lee H., Roh M.-I., Kim K.-S. Ship route planning in Arctic Ocean based on POLARIS. Ocean Engineering. 2021;234:109297. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109297.
21. Topaj A., Tarovik O., Bakharev A., Kondratenko A. Optimal ice routing of a ship with icebreaker assistance. Applied Ocean Research. 2019;86:177–187. DOI: 10.1016/j.apor.2019.02.021.
22. Shu Y., Zhu Y., Xu F., et al. Path planning for ships assisted by the icebreaker in ice-covered waters in the Northern Sea Route based on optimal control. Ocean Engineering. 2023;267:113182. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113182.
23. Gongxing W., Incecik A., Tezdogan T., et al. Long-voyage route planning method based on multi-scale visibility graph for autonomous ships. Ocean Engineering. 2021;219:108242. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108242.
24. Moskalenko M.A., Chernyavich S.E., Pushkarev I.I., Titov A.V. Autonomous shipping technologies, trends and perspectives. Marine Intelligent Technologies. 2023;(1-1):18–28. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.001.

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

Акмайкин Денис Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры судовождения, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая 50а, e-mail: akmaykin@gmail.com

Denis M. Akmaykin, Ph.D. (Eng), associate professor of department of navigation, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, 50a, Verkhneportovaya st., Vladivostok, 690003, Russian Federation, e-mail: akmaykin@msun.ru

Гриняк Виктор Михайлович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных технологий и систем, Владивостокский государственный университет, 190014, Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: victor.grinyak@gmail.com

Victor M. Grinyak, Dr. Sci. (Eng), professor of department of information systems and technologies, Vladivostok State University, 41, Gogolya st., Vladivostok, 690014, Russian Federation, e-mail: victor.grinyak@gmail.com

Девятисильный Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник сектора управления и навигации, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5, e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Alexander S. Devyatisilnyi, Dr. Sci. (Eng), professor, navigation and control department, Institute of Automation and Control Processes FEBRAS, 5, Radio st., Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Кузнецов Пётр Анатольевич, руководитель Инженерной школы, Владивостокский государственный университет, 190014, Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: petr.kuznetsov@vvsu.ru

Petr A. Kuznetsov, head of engineering department, Vladivostok State University, 41, Gogolya st., Vladivostok, 690014, Russian Federation, e-mail: petr.kuznetsov@vvsu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 27.11.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.01.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 14.02.2026.

Научная статья

УДК 621.86

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.027>

Вероятностно-статистический метод оценки рисков эксплуатации устройств подъемно-транспортного оборудования

Аблязов¹ Э.К. amigab@mail.ru, Аблязов¹ К.А. kiril123@bk.ru

¹Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В статье рассматриваются статистические методы оценки рисков эксплуатации устройств подъемно-транспортного оборудования (ПТО) по данным эксплуатации группы однотипного оборудования ПТО. Для вероятностной оценки риска эксплуатации устройств ПТО за весь нормативный срок эксплуатации использовано применение композиции нормальных законов распределения отказов устройств за календарный год эксплуатации.

В эксплуатационной документации может отсутствовать нормативный срок эксплуатации. В качестве нормативного срока эксплуатации ПТО до списания берутся нормы амортизации, отражающие средний срок эксплуатации объектов данного класса. Используемый в работе статистический метод позволяет практически учесть вероятностный характер риска эксплуатации устройства ПТО, при этом детальной информации не требуется.

Объем выборки оценивается числом одновременно эксплуатируемых устройств ПТО с учетом полученных от каждого из них информации с журналов учета наработок, неисправностей и отказов оборудования. При таком подходе обеспечивается достаточный объем выборки и тем самым достаточно адекватная вероятностная оценка риска эксплуатации при использовании метода.

Ключевые слова: подъемно-транспортное оборудование, риск, среднее квадратическое отклонение, математическое ожидание, композиция нормальных законов распределения.

Для цитирования: Аблязов Э.К., Аблязов К.А. Вероятностно-статистический метод оценки рисков эксплуатации устройств подъемно-транспортного оборудования. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 253—260. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.027.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.027>

Probabilistic and statistical method for assessing the risks of using lifting and transport equipment

Emil K. Ablyazov¹ amigab@mail.ru, Kemal A. Ablyazov¹ kiril123@bk.ru

¹ Admiral Ushakov Maritime State University, Russian Federation

Abstract. The article discusses statistical methods for assessing the risks of operating lifting and transport equipment (LTE) based on the operation of a group of similar LTE equipment. For the probabilistic assessment of the risk of operating LTE devices for the entire standard service life, a composition of normal distribution laws for device failures over a calendar year of operation was used.

The operational documentation may not include a standard operating life. The depreciation rates reflecting the average service life of objects of this class are used as the standard service life of the LTE before disposal. The statistical method used in this work allows for the practical consideration of the probabilistic nature of the risk associated with the operation of the LTE device, without requiring detailed information.

The sample size is estimated by the number of LTE devices that are being operated simultaneously, taking into account the information obtained from each of them from the logs of operating time, malfunctions and equipment failures. This approach ensures a sufficient sample size and, therefore, an adequate probabilistic assessment of the risk of operation when the method is used.

Keywords: lifting and transport equipment, risk, standard deviation, mathematical expectation, composition of normal distribution laws

For citation: Emil K. Ablyazov, Kemal A. Ablyazov Probabilistic and statistical method for assessing the risks of using lifting and transport equipment. Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 253—260. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.027.

Введение

В реальных условиях эксплуатации наработка, измеренная в часах или километрах (для транспортных средств), связана пропорциональной зависимостью со сроком эксплуатации. Фактические моменты достижения устройствами ПТО предельного состояния могут существенно различаться в зависимости от индивидуальных

свойств и условий эксплуатации объектов. Поэтому срок службы устройств следует считать случайными величинами, которые могут описываться вероятностными моделями [1].

Ресурс устройств ПТО из-за воздействия на них множества случайных факторов варьирует в довольно широких пределах. Достижение ПТО предельного состояния, соответствующего истощению его ресурса, сводится не только к

физическому износу. Оно может быть обусловлено также влиянием факторов функционального устаревания, недопустимости дальнейшей эксплуатации по требованиям безопасности, экономичности и эффективности [2].

ПТО – это сложная система, состоящее из многих устройств и даже зная точно сроки службы каждого его устройства, определить срок службы ПТО в целом представляется сложной задачей. Состояние ПТО следует квалифицировать как предельное при резком увеличении интенсивности отказов, продолжительности простоев из-за необходимости их устранения, расходов на проведение ремонтных работ. В целом, при достижении нормативного срока эксплуатации, дефекты несущих металлоконструкций ПТО начинают приобретать системный характер, что требует принятия решения о сроке достижения ПТО предельного состояния [2].

Достижение объектом нормативного срока не означает, что объект достиг предельного состояния и должен быть снят с эксплуатации. Чтобы обеспечить уверенную эксплуатацию объекта в течение установленного срока, объект должен иметь некоторый запас прочности, который дает возможность уверенно эксплуатировать объект в течение нормативного срока и еще некоторое время после окончания этого срока.

В условиях реальной эксплуатации ПТО при проведении технических обслуживаний и ремонтов чаще всего оценивается остаточный ресурс их узлов, агрегатов и механизмов. Здесь уместно использовать теорию надежности, в которой сроки службы машин рассматриваются как случайные [3].

Современные методы вероятностных оценок ресурса, связанных с износом, усталостью и статической прочностью находят все большее применение [4].

Прогнозирование остаточного ресурса в первую очередь имеет цель предотвратить и/или минимизировать последствия аварий и инцидентов, повлекших риск потери жизни и здоровья людей, задействованных в процессе монтажа (демонтажа), пуско-наладки, модернизации и дальнейшей эксплуатации ПТО [5].

Важнейшими характеристиками надежности технических объектов являются ресурс и остаточный ресурс. Эти величины не могут считаться детерминированными, так как для разных, однородных по характеристикам технических объектов эти величины принимают различные значения [6].

Знание вида закона распределения позволяет сделать с некоторой вероятностью прогноз о величинах ресурса и остаточного ресурса. В работе [1] предложен один из вероятностных методов оценки ресурса и остаточного ресурса, основанного на применении логнормального распределения.

В работе [7] производится оценка остаточного ресурса грузоподъемного крана путем определения группы классификации режима крана, составлении временного ряда, представляющего собой результат наблюдения за одним или несколькими параметрами какого-либо процесса. При наблюдении фиксируется значение этих параметров и привязывается к моменту наблюдения. В результате образуется последовательность измеренных значений,

упорядоченная в хронологическом порядке и на этой основе рассчитывается остаточный ресурс крана.

В ряде работ используется нормальный закон распределения для моделирования процесса изнашивания изделия; нормальным распределением описывается нагрузка в машинах, несущая способность деталей машин, ресурс и срок службы объектов при изнашивании [8, 9, 10].

В данной работе представлен метод вероятностного прогнозирования риска эксплуатации устройств ПТО, основанный на применении нормального закона распределения. Обработка статистических данных эксплуатации устройств портового подъемно-транспортного оборудования осуществляется без привязки к стадиям функционирования ПТО [11]. Согласно пункта 1 ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска» стандарт не содержит конкретных критериев для принятия решения по анализу риска и указаний по применению методов анализа риска в конкретной ситуации. Поэтому решения в этой области носят характер рекомендаций и концепций, а не строго предписанных действий. Задача вероятностно-статистического метода оценки риска эксплуатации устройств ПТО — дать пользователю возможность оценить риск эксплуатации устройств ПТО после нормативного срока эксплуатации с достаточной степенью достоверности.

Постановка проблемы (задачи)

Важнейшими характеристиками надежности технических объектов являются ресурс и остаточный ресурс. Эти величины не могут считаться детерминированными, так как для разных, однородных по характеристикам технических объектов эти величины принимают различные значения [1-4].

Следует отметить, продление ресурса экономически целесообразно, если в допустимых пределах увеличиваются затраты на эксплуатацию объекта. В этом отношении целесообразно сформулировать и решить задачу определения оптимального ресурса [3, 4].

В теории надежности вводится понятие функции выживаемости («дожития») [12]:

$$S(t) = P(T > t) \text{ или } S(t) = 1 - P(T \leq t), \quad (1)$$

где T – непрерывная случайная величина (СВ), представляющая время до наступления события; t – текущее время. Таким образом, $S(t)$ представляет вероятность надежности устройства до времени t . Статистическое содержание этой функции состоит в том, что она показывает, сколько в среднем объектов из совокупности «доживают», как минимум, до времени t . Свойства функции $S(t)$: $S(t) = 1$ при $t=0$ и $S(t) = 0$ при $t=\infty$. Функция выживания однозначно определяется функцией риска (hazard function): $h(t)=f(t)/S(t)$, которая в рассматриваемом случае понимается как условная вероятность того, что событие отказа произойдет в бесконечно малом интервале $[t, t+dt]$ при условии того, что на момент t событие отказа не произошло. Так как функция отказа $F(t) = P(T \leq t)$, то в дальнейшем функцию выживаемости будем определять по формуле:

$$S(t) = 1 - F(t). \quad (2)$$

Введем понятие функции риска ($h(t)$), что означает вероятность наступления события в конкретный момент времени t , при условии, что оно не наступило до этого момента. Зачастую функция риска называется интенсивностью наступления событий. В качестве определения функции риска можно использовать следующее выражение [12, 13]:

$$h(t) = f(t)/S(t), \quad (3)$$

так как $f(t) = -F'(t) = -S'(t)$, то для непрерывных случайных величин: $h(t) = -S'(t)/S(t) = -(\ln S(t))'$.

Функции выживаемости и риска дают альтернативные описания распределения СВ T . Зная функцию выживаемости $S(t)$ можно получить функцию плотности распределения $f(t)$, а затем найти функцию риска по уравнению (3).

В дискретном случае риск - это условная вероятность, не превосходящая значения 1, а выживаемость $S(t)$ - неотрицательная функция, начинающаяся со значения 1 и монотонно убывающая, $S(\infty) = 0$ [13].

Устойчивость нормального закона по отношению к линейному преобразованию определяет его широкое применение в инженерной практике. Поэтому, в случае, когда говорят о композиции законов распределения нескольких СВ - это значит найти закон распределения суммы этих независимых СВ [14].

Так как особенностью нормального закона является то, что при композиции достаточно большого числа нормальных законов распределения суммарный закон оказывается снова нормальным, то возможно применить композицию нормальных законов распределения отказов устройств за календарный год эксплуатации, причем их математические ожидания и дисперсии суммируются.

Таким образом, если имеется n независимых СВ: $X_1, X_2, \dots, X_n$, подчиненных нормальным законам с математическими ожиданиями $m_{x_1}, m_{x_2}, \dots, m_{x_n}$ и

$$P(T \leq t < +\infty) = \Phi\left(\frac{+\infty - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{T - \mu}{\sigma}\right) = 0,5 - \Phi\left(\frac{T - \mu}{\sigma}\right), \quad (8)$$

где $P(T \leq t < +\infty)$ - вероятность того, что объект достигнет срока службы T . Как видно из формул (6) и (8) дискретные значения функции выживаемости $S(t_i)$ и вероятности срока службы $P(T \leq t_i < +\infty)$ совпадают при одном и том же значении t_i , так как $T = t_i$.

Материалы и методы

На рис. 1 представлена классификация отказов по степени влияния на рабочий процесс автопогрузчика «Тойота». В классификации отказов все отказы поделены на 2 группы и 6 подгрупп. В эксплуатационных условиях ведется журнал ремонта, в котором отражаются время наступления

средними квадратическими отклонениями $\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \dots, \sigma_{x_n}$, то величина $Z = X_1 + X_2 + \dots + X_n$ также подчинена нормальному закону с параметрами $m_z = \sum_{i=1}^n m_{x_i}$, $\sigma_z^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_{x_i}^2$ [14].

Плотность вероятности композиции нормального распределения (4) в зависимости от календарного времени t , математического ожидания μ и среднего квадратического отклонения σ (СКО) определяется по формуле:

$$f(t, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

где $t > 0$, $-\infty < \mu < +\infty$ - математическое ожидание и $\sigma > 0$ - СКО композиции нормального распределения. Интегральная функция композиции нормального распределения (функция отказов) будет равна:

$$F(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt.$$

Для вычисления интегральной функции нормального распределения можно воспользоваться табличным интегралом Лапласа:

$$F(t) = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right). \quad (5)$$

Для задач с дискретными СВ функция выживаемости и риска определяются по следующим формулам: [12]:

$$S(t_i) = 1 - F(t_i) \quad (6)$$

$$h(t_i) = h_i = f_i/S_i. \quad (7)$$

Вероятность достижения срока службы $P_i(t_i)$ для дискретных СВ [15] вычисляется согласно выражения:

отказа конкретного ПТО, причина отказа, дата и время начала и окончания ремонта. В сводной таблице 1 приведены отказы гидравлической системы 6-ой подгруппы шести автопогрузчиков «Тойота» 7FDA50 и шести автопогрузчиков «Тойота» 8FDN50 за двенадцать месяцев 2024 г. Вышеназванные автопогрузчики имеют одинаковые устройства, но отличаются только грузоподъемностью.

Распределение СВ отказов элементов гидравлической системы подчиняется нормальному закону распределения, что проверено критерием Пирсона (хи-квадрат) [16].

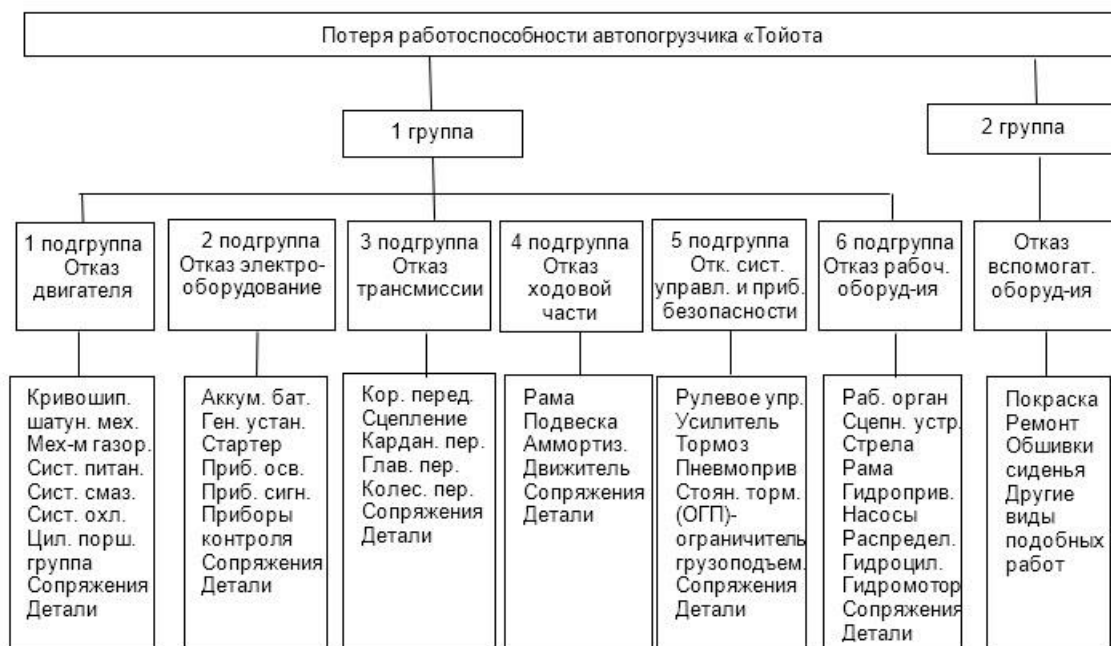


Рис. 1 – Классификация отказов по степени влияния на рабочий процесс автопогрузчика

Таблица 1

Сводная таблица отказов гидравлической системы 6-ой подгруппы шести автопогрузчиков «Тойота» 7FDA50 N=6 и шести автопогрузчиков «Тойота» 8FDN50 за двенадцать месяцев 2024 г.

№ п/п	Месяцы	Интервалы в сутках, (Δt)	Середина интервалов, t _i мес.	Число отказов, n _i
1	Январь	0-30	0,5	4
2	Февраль	30-60	1,5	3
3	Март	60-90	2,5	1
4	Апрель	90-120	3,5	1
5	Май	120-150	4,5	2
6	Июнь	150-180	5,5	2
7	Июль	180-210	6,5	1
8	Август	210-240	7,5	1
9	Сентябрь	240-270	8,5	1
10	Октябрь	270-300	9,5	3
11	Ноябрь	300-330	10,5	3
12	Декабрь	330-360	11,5	2
	Итого:			Σn _i =24

На основании данных таблицы 1 могут быть найдены основные числовые характеристики случайной величины нормального распределения (математическое ожидание $M(x)$):

$$M(x) = \frac{\sum_{i=1}^k t_i \cdot n_i}{n} = \frac{138}{24} = 5,75,$$

где n_i - количество отказов элементов помесечно в течение года ($n=24$); t_i - середина интервала (месяца), $k=12$ - число временных интервалов.

Для нормативного срока службы устройств ПТО применим композицию нормальных распределений за 7 календарных лет (что соответствует 7 годам срока службы), т.е., если обозначить математическое

ожидание композиции буквой μ и СКО композиции буквой σ , то имеем: $\mu=7 \cdot M(x)=7 \cdot 5,75=40,25$ и $\sigma=0,4 \cdot \mu=0,4 \cdot 40,25=16,1$. Так как согласно [1, 17, 18], коэффициент вариации для машин и оборудования

лежит в пределах 0,3 – 0,4, то СКО композиции определяется как: $\sigma=0,4 \cdot \mu$

Если предположить, что устройство ПТМ с высокой вероятностью должно прослужить в течение заданного срока, то используя указанные выше формулы (4-8) можно рассчитать функцию отказов, функцию выживаемости, плотность распределения СВ, функцию риска и вероятность достижения срока службы, характеризующие вероятностные состояния оцениваемых устройств за время эксплуатации в зависимости от календарного времени эксплуатации, а также сверхнормативного времени.

Результаты

Если предположить, что устройство ПТМ с высокой вероятностью должно прослужить в течение заданного срока, то используя указанные выше формулы (4-8) можно рассчитать дискретные значения интегральной функции нормального

распределения (функции отказов), функции выживаемости, плотности распределения СВ, функции рисков и вероятности достижения срока службы, характеризующие вероятностные состояния оцениваемых устройств за время эксплуатации в

зависимости от календарного времени эксплуатации, а также сверхнормативного времени. В таблице 1 приведены вычисленные значения вышеназванных параметров.

Таблица 2

Значения интегральной функции нормального распределения (функции отказов), функции выживаемости, плотности распределения СВ, функции рисков и вероятности достижения срока службы в зависимости от календарного времени ($\mu=40,25$, $\sigma=16,1$)

Календарное время, t_i	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Интегральная функция, $F(t_i)$	0,0062	0,0301	0,1038	0,2611	0,4920	0,7291	0,8907	0,9678	0,9932	0,9990	0,99990
Функция выживаемости, $S(t_i)$	0,9938	0,9699	0,8962	0,7389	0,5080	0,2709	0,1093	0,0322	0,0068	0,0010	0,00010
Плотность распределения, $f(t_i)$	0,0011	0,0042	0,0112	0,0203	0,0248	0,0206	0,0117	0,0045	0,0012	0,0002	0,00003
Функция рисков, $h(t_i)=f_i/S_i$	0,0011	0,0043	0,0125	0,0275	0,0488	0,0760	0,1070	0,1398	0,1765	0,2000	0,30000
Вероятность достижения срока службы, $P_i(t_i)$	0,9938	0,9699	0,8962	0,7389	0,5080	0,2709	0,1093	0,0322	0,0068	0,0010	0,00010

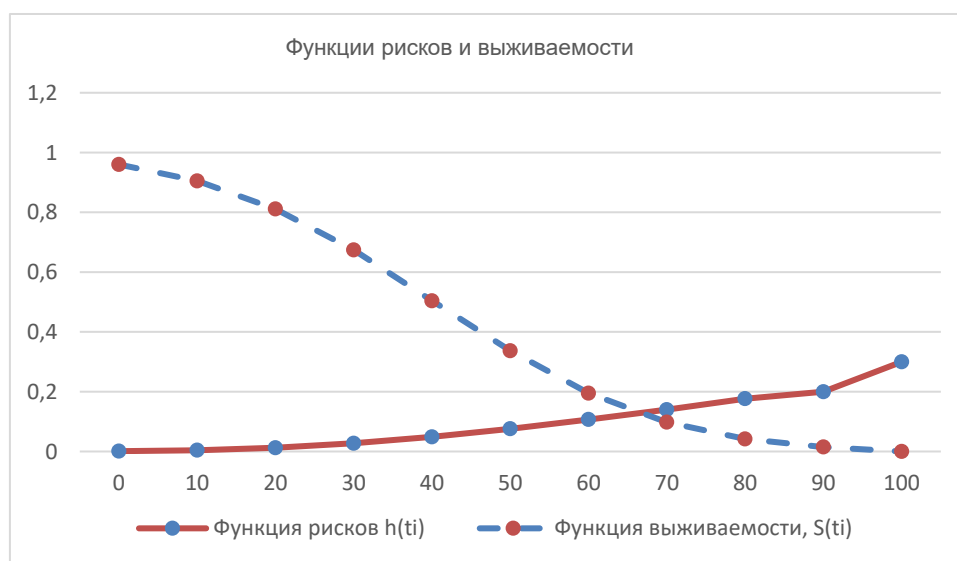


Рис. 2 – Графическое изображение функций рисков и выживаемости

По данным таблицы можно построить график функций риска и выживаемости (рис. 2) и сделать вывод, что начиная с календарного времени равного 90 месяцам и выше риск эксплуатации устройства гидропривода значительно возрастает, а вероятность достижения срока службы гидравлической системы значительно падает, что означает повышение риска отказа устройства. Таким образом, эксплуатация гидравлической системы сверхнормативного срока эксплуатации связана с

повышением риска эксплуатации согласно данных таблицы 2.

Как видно из формулы (5) вероятностная достоверность интегральной функции нормального распределения зависит от параметров μ и σ , т.е. параметров композиции нормальных законов, рассчитанных за весь срок эксплуатации автопогрузчиков «Тойота». Вероятностная достоверность оценки риска эксплуатации устройств ПТО также зависит от параметров μ и σ композиции нормальных законов, рассчитанных за весь срок

эксплуатации автопогрузчиков "Тойота". Анализ литературы, обобщающей многочисленные исследования по надежности и долговечности машин и оборудования [17, 18], показывает, что коэффициент вариации для машин и оборудования лежит в пределах: 0,3 – 0,4 [1]. Поэтому, если в качестве расчетов использовать другое среднее значение коэффициента вариации за нормативный срок эксплуатации, то результаты расчетов несколько изменятся.

Согласно пункта 1 ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска» стандарт не содержит конкретных критериев для принятия решения по анализу риска и указаний по применению

методов анализа риска в конкретной ситуации, а также ГОСТ Р ИСО 13381-1-2016: гласит, что прогнозирование технического состояния машины (требующее предсказания, в какой степени работоспособность машины сохранится в будущем), основанное на статистическом подходе, не предполагает безошибочных решений. Поэтому решения в этой области носят характер рекомендаций и концепций, а не строго предписанных действий.

В таблице 3 приведены последовательности этапов определения вероятностного риска эксплуатации устройств ПТО по месяцам эксплуатации.

Таблица 3

Этапы определения риска эксплуатации устройств ПТО по месяцам эксплуатации

№ этапов	Производимые мероприятия
1	Согласно исходных данных эксплуатации группы конкретных типов ПТО за один год эксплуатации, определяется математическое ожидание $M(x)$, придерживаясь гипотезы, что распределение СВ подчинено нормальному закону.
2	Проверка согласия между эмпирическим и теоретическим распределением по критерию Пирсона (хи-квадрат) для подтверждения правильности гипотезы о выбранном нормальном законе распределения
3	Для композиции нормальных законов распределений определяется математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение согласно формул: $\mu = 7 \cdot M(x)$, $\sigma = 0,4 \cdot \mu$, где 0,4 – коэффициент вариации, выбираемый из диапазона 0,3÷0,4.
4	Вычисляются: интегральная функция нормального распределения (функция отказов), функция выживаемости, плотность вероятности нормального распределения, риск эксплуатации устройств ПТО, вероятность достижения срока службы согласно формул (4-8).

Заключение

В работе рассмотрен метод оценки рисков эксплуатации устройств ПТО с использованием параметров нормального закона распределения. Вычисленные значения вероятностной оценки риска основываются на параметре математического ожидания композиции нормальных распределений, полученных в результате обработки эксплуатационных данных группы конкретных устройств однотипных ПТО, а также интегральной

функции и плотности вероятности нормального распределения композиции. По значениям математического ожидания композиции вычисляется среднее квадратическое отклонение согласно выражения: $\sigma = 0,4 \cdot \mu$, а также все параметры, представленные в таблице 2.

Для получения достоверной информации целесообразно формировать базу статистических данных для конкретных устройств однотипных ПТО.

Литература

1. Лейфер Л.А., Кашникова П.М. Определение остаточного срока службы машин и оборудования на основе вероятностных моделей. // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2008 №76. с. 66-79.
2. Баженов Ю.В., Баженов М.Ю. Прогнозирование остаточного ресурса конструктивных элементов автомобилей в условиях эксплуатации // Фундаментальные исследования. 2015. № 4. с. 16-21.
3. Смоляк С.А. О вероятностных моделях для оценки остаточного срока службы и износа машин и оборудования. Имущественные отношения В РФ. №2 (186), 2017. с. 75-87.
4. Лукинский В.С., Зайцев Е.И. Прогнозирование надежности автомобилей. – Ленинград: Политехника, 1991. с. 224.
5. Бельман П.А. Остаточный ресурс грузоподъемных кранов. / П.А.Бельман, Н.В.Юденко, Е.В.Шефер. - //Молодой ученый. -2016. - №10 (114). с. 128-131.
6. Слиденко А. М., Панарин М. А. Алгоритм оценки остаточного ресурса технических объектов при априорной оценке законов распределения. // Актуальные исследования. 2022. №30 (109). с. 6-12.
7. Янаева М.В., Капуста Э.В., Лавров А.А. Автоматизация расчета остаточного ресурса грузоподъемных машин // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3
8. Проников А.С. Надежность машин. – Учебник. Машиностроение, М.: 1978. с. 592.
9. Брауде В.И., Семенов Л.Н. Надежность подъемно-транспортных машин. - Учебник. Машиностроение, Л.: 1986. с. 183.
10. Солод В.И., Гетопанов В.Н., Шпильберг И.Л. Надежность горных машин и комплексов. – МГИ, М.: 1972. с. 192.
11. Антонов А.В., Чепурко В.А. Модель неоднородного альтернирующего процесса восстановления. Вестник кибернетики. 2017. - №3. с.9-18.
12. Родригес Г. Модели выживаемости. Квантиль, международный эконометрический журнал на русском языке, №5, сентябрь 2008 г., с. 1-28.

13. Остапенко А.Г. Жизнестойкость атакуемых распределенных систем: оценка рисков фатальных отказов компонентов / А.Г. Остапенко, Д.Г. Плотноков О.Ю. Макаров, Н.М. Тихомиров, В. Г. Юрасов; под ред. чл.-корр. РАН Д.А. Новикова. – Воронеж: Научная книга, 2013. – 160 с.
14. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для вузов. – 6-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 1999. с.576.
15. Аблязов Э.К., Аблязов К.А. Вероятностная оценка ресурса подъемно-транспортного оборудования по параметрам надежности. Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 1, С. 208—215. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.048
16. Аблязов Э.К., Аблязов К.А. Оценка показателей надежности однотипных портовых перегрузочных машин с учетом ординарности и однородности потока отказов в эксплуатационных условиях. Морские интеллектуальные технологии. 2023. №4 часть 1, с. 232-241. DOI: 10.37220/MIT. 2023.62.4.028
17. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин. - Учебное пособие. Высшая школа, М.: 1988
18. Надежность и эффективность в технике. Справочник в 10 томах, М., «Машиностроение», 1987, с. 351

References

1. Leyfer L.A., Kashnikova P.M. Opredelenie ostatochnogo sroka sluzhby mashin i oborudovaniya na osnove veroyatnostnykh modeley. [Determining the residual service life of machines and equipment based on probabilistic models]. // Imushchestvennye otnosheniya v Rossiyskoy Federatsii. 2008 №76. s. 66-79.
2. Bazhenov Yu.V., Bazhenov M.Yu. Prognozirovaniye ostatochnogo resursa konstruktivnykh elementov avtomobiley v usloviyakh ekspluatatsii. [Predicting the residual resource of vehicle structural elements under operating conditions]. // Fundamental'nye issledovaniya. 2015. № 4. s 16-21.
3. Smolyak S.A. O veroyatnostnykh modelyakh dlya otsenki ostatochnogo sroka sluzhby i iznosa mashin i oborudovaniya. [On probabilistic models for assessing the residual service life and wear of machinery and equipment]. Imushchestvennye otnosheniya V RF. Property Relations in the Russian Federation]. №2 (186), 2017. s 75-87.
4. Lukinskiy V.S., Zaytsev E.I. Prognozirovaniye nadezhnosti avtomobiley. [Predicting car reliability]. – Leningrad: Politehnika, 1991. s. 224.
5. Bel'man P.A. Ostatochnyy resurs gruzopod'emnykh kranov. [Residual life of lifting cranes]. / P.A.Bel'man, N.V.Yudenko, E.V.Shefer. - //Molodoy uchenyy. -2016. - №10 (114). s 128-131.
6. Slidenko A. M., Panarin M. A. Algoritm otsenki ostatochnogo resursa tekhnicheskikh ob'ektov pri apriornoy otsenke zakonov raspredeleniya [Algorithm for estimating the residual resource of technical objects based on a priori estimation of distribution laws]. // Aktual'nye issledovaniya. 2022. №30 (109). s. 6-12.
7. Yanaeva M.V., Kapusta E.V., Lavrov A.A. Avtomatizatsiya rascheta ostatochnogo resursa gruzopod'emnykh mashin. [Automation of calculating the residual resource of load-lifting machines]. // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2013. – № 3.
8. Pronikov A.S. Nadezhnost' mashin. [Machine reliability]. – Uchebnik. Mashinostroenie, M.: 1978. s. 592.
9. Braude V.I., Semenov L.N. Nadezhnost' pod'emno-transportnykh mashin. [Reliability of lifting and transport machines]. - Uchebnik. Mashinostroenie, L.: 1986. s 183.
10. Solod V.I., Getopanov V.N., Shpil'berg I.L. Nadezhnost' gornykh mashin i kompleksov. [Reliability of mining machines and complexes]. – MGI, M.: 1972. s 192.
11. Antonov A.V., Chepurko V.A. Model' neodnorodnogo al'terniruyushchego protsessa vosstanovleniya. [Model of heterogeneous alternating recovery process]. Vestnik kibernetiki. 2017 - №3. s. 9-18.
12. Rodrigues G. Modeli vyzhivaemosti. Kvantil', mezhdunarodnyy ekonometricheskij zhurnal na russkom yazyke, [Survival models]. №5, sentyabr' 2008 g., s. 1-28.
13. Ostapenko A.G. Zhiznesteikost atakuemikh raspredelennikh sistem: otsenka riskov fatalnykh otkazov komponentov. [Resilience of attacked distributed systems: assessing the risks of fatal component failures]. / A.G. Ostapenko, D.G. Plotnikov O.Yu. Makarov, N.M. Tikhomirov, V. G. Yurasov; pod red. chl.-korr. RAN D.A. Novikova. – Voronezh: Nauchnaya kniga, 2013. s. 160
14. Venttsel' E.S. Teoriya veroyatnostey [Probability theory]: uchebnik dlya vuzov. – 6-e izd., ster. – M.: Vysshaya shkola, 1999. s. 576
15. Ablyazov E.K., Ablyazov K.A. Veroyatnostnaya otsenka resursa podemno-transportnogo oborudovaniya po parametram nadezhnosti. [Probabilistic and statistical method for assessing the risks of using lifting and transport equipment]. Morskie intellektualnye tekhnologii. 2025. № 4 chast' 1, S. 208—215. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.048
16. Ablyazov E.K., Ablyazov K.A. Otsenka pokazateley nadezhnosti odnotipnykh portovykh peregruzochnykh mashin s uchedom ordinarnosti i odnorodnosti potoka otkazov v ekspluatatsionnykh usloviyakh. [Evaluation of the reliability indicators of the same type of port handling machines, taking into account the ordinarieness and homogeneity of the failure rate under operational conditions]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2023. №4 chast' 1, s. 232-241. DOI: 10.37220/MIT. 2023.62.4.0217.
17. Reshetov D.N., Ivanov A.S., Fadeev V.Z. Nadezhnost' mashin. [Machine reliability]. - Uchebnoe posobie. Vysshaya shkola, M.: 1988.
18. Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike. Spravochnik v 10 tomakh [Reliability and Efficiency in Engineering. A Handbook in 10 Volumes]. M., «Mashinostroenie», 1987, s. 351

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

Аблязов Эмиль Кемалович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины и комплексы», «Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф.Ушакова», 353924, Краснодарский Край, г.Новороссийск, пр. Ленина, д. 93. e-mail: amigab@mail.ru

Emil K. Ablyazov, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Lifting and transport machines and complexes, Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossisk, Lenin's avenue, 93 bodies, Russian Federation, e-mail: amigab@mail.ru

Аблязов Кемал Абдуллаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины и комплексы», «Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф.Ушакова», 353924, Краснодарский Край, г.Новороссийск, пр. Ленина, д. 93. e-mail: kiril123@bk.ru

Kemal A. Ablyazov, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Lifting and transport machines and complexes, Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossisk, Lenin's avenue, 93 bodies, Russian Federation, e-mail: kiril123@bk.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.01.2026.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.02.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 14.02.2026.

Научная статья

УДК 303.732.4

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.036>

Анализ эволюции нейросетевых методов глубокого обучения и алгоритмов фильтрации состояний для отслеживания и прогнозирования траекторий движения морских объектов в системе поддержки принятия решений

Полковникова Н.А.¹ natalia-polkovnikova@mail.ru, Полковников А.К.¹ polkov5@mail.ru¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В статье представлен комплексный анализ эволюции нейросетевых архитектур для задач компьютерного зрения с оценкой перспектив роста вычислительной сложности и повышения точности алгоритмов обработки визуальной информации. Современные методы глубокого обучения обладают высоким потенциалом для применения в системах безэкипажного судовождения, обеспечивая повышение уровня автономности, навигационной безопасности и устойчивости управления в условиях динамично изменяющейся морской обстановки. Цель исследования заключается в разработке прототипа системы поддержки принятия решений (СППР), обеспечивающей автоматизированное обнаружение, отслеживание и прогнозирование траекторий движения морских объектов на основе гибридного сочетания нейросетевых методов компьютерного зрения и алгоритмов фильтрации состояний. Синергия компьютерного зрения и СППР является важным шагом на пути к созданию полностью автономных систем принятия решений, которые позволят автоматизировать процессы визуального контроля, повысить навигационную безопасность и снизить влияние человеческого фактора. Научная новизна исследования заключается в гибридном подходе, сочетающем глубокие нейронные сети и алгоритмы фильтрации состояний, адаптированные к морскому мониторингу. Выбрана наиболее оптимальная нейросетевая архитектура для интеграции в СППР с адаптивным фильтром Калмана. При создании прототипа СППР использованы методы предварительной обработки данных, аугментации и оптимальные режимы обучения в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. В основу программной реализации положена модифицированная архитектура YOLO v11, интегрированная с адаптивным фильтром Калмана для обнаружения, слежения и прогнозирования траекторий движения морских объектов. Разработанная система обеспечивает обработку изображений, видео и видеопотока реального времени. Результаты исследования подтверждают практическую значимость гибридного подхода и возможность его внедрения в интеллектуальные системы мониторинга и управления морским транспортом.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, свёрточные нейронные сети, машинное обучение, компьютерное зрение, алгоритмы фильтрации состояний, адаптивный фильтр Калмана

Для цитирования: Полковникова Н.А., Полковников А.К. Анализ эволюции нейросетевых методов глубокого обучения и алгоритмов фильтрации состояний для отслеживания и прогнозирования траекторий движения морских объектов в системе поддержки принятия решений, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 261—275. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.036.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.036>

Analysis of the evolution of deep learning neural network methods and state filtering algorithms for tracking and predicting maritime object trajectories in decision support system

Natalia A. Polkovnikova¹ natalia-polkovnikova@mail.ru, Anatoly K. Polkovnikov¹ polkov5@mail.ru¹ Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of the evolution of neural network architectures for computer vision tasks, including an assessment of the prospects for increasing computational complexity and improving the accuracy of visual information processing algorithms. Modern deep learning methods demonstrate significant potential for application in unmanned maritime navigation systems, ensuring increased autonomy, navigation safety, and resilience of control in dynamically changing marine environments. The aim of the study is to develop a prototype of a Decision Support System (DSS) that provides automated detection, tracking, and trajectory prediction of maritime objects based on a hybrid combination of neural network computer vision methods and state-filtering algorithms. The synergy of computer vision and DSS represents an important step toward the creation of fully autonomous decision-making systems capable of automating visual monitoring processes, enhancing navigation safety, and reducing the impact of the human factor. The scientific novelty of the research lies in a hybrid approach that combines deep neural networks and state-filtering algorithms adapted to maritime monitoring. The most optimal neural network architecture was selected for integration into the DSS with an adaptive Kalman filter. The DSS prototype development applied data preprocessing techniques, augmentation methods, and optimal training regimes under limited computational resources. The software implementation is based on a modified YOLO v11 architecture integrated with an adaptive Kalman filter for the detection, tracking, and trajectory prediction of maritime objects. The developed system supports the processing

of images, videos, and real-time video streams. The research results confirm the practical significance of the hybrid approach and the feasibility of its integration into intelligent systems for maritime transport monitoring and control.

Keywords: decision support system, convolutional neural networks, machine learning, computer vision, state filtering algorithms, adaptive Kalman filter

For citation: Natalia A. Polkovnikova, Anatoly K. Polkovnikov, Analysis of the evolution of deep learning neural network methods and state filtering algorithms for tracking and predicting maritime object trajectories in decision support system, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 261—275. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.036.

Искусственный интеллект как фактор эволюции систем поддержки принятия решений

Искусственный интеллект (ИИ) играет ключевую роль в развитии и эволюции систем поддержки принятия решений (СППР), значительно расширяя их функциональные возможности и области применения. Современные СППР уже не ограничиваются выполнением задач по сбору, хранению и обработке данных – их эффективность во многом определяется способностью к интеллектуальному анализу информации, прогнозированию и адаптации к изменяющейся среде, что обеспечивается именно технологиями ИИ.

Интеграция методов ИИ, включая машинное обучение, нейросетевые алгоритмы позволяет перейти от статического анализа к динамическому формированию рекомендаций СППР, учитывать сложные нелинейные зависимости и работать с большими объемами разнородных данных. Это повышает точность прогнозов, сокращает время выработки решений и обеспечивает их обоснованность даже в условиях неопределённости и неполноты информации.

Современные СППР всё чаще выходят за рамки традиционного анализа числовых и текстовых данных, стремясь интегрировать более сложные и разнообразные источники информации. Одним из наиболее перспективных направлений является использование технологий компьютерного зрения (Computer Vision, CV), которые позволяют извлекать, интерпретировать и анализировать информацию из визуальных данных – изображений и видеопотоков в автоматическом режиме. Это направление особенно актуально в задачах, где требуется высокий уровень автоматизации визуального анализа и контроля. В международной практике компьютерное зрение уже применяется для автоматического распознавания судов и контейнеров в портах, обеспечения безопасности на борту и в акваториях с помощью анализа видеопотока в реальном времени, автоматизации процессов швартовки и навигации на автономных судах, а также мониторинга и оценки технического состояния судов с использованием дронов и видеоаналитики.

Современные методы и алгоритмы компьютерного зрения, включая свёрточные нейронные сети, методы детектирования объектов, сегментации сцен и анализа движений, позволяют автоматически извлекать из изображений и видео значимые признаки. Эти признаки затем могут использоваться в качестве входных параметров для аналитических и прогнозных моделей внутри СППР.

Такой подход не только повышает точность оценок, но и обеспечивает их актуальность, поскольку визуальные данные поступают в режиме реального времени.

Синергия компьютерного зрения и СППР является важным шагом на пути к созданию полностью автономных систем принятия решений. В перспективе такие системы смогут самостоятельно анализировать визуальные данные, интерпретировать их в контексте текущих задач и формировать оптимальные решения без участия человека. Это особенно актуально для таких направлений, как автономный транспорт и безэкипажное судоходство.

Цель исследования заключается в разработке прототипа СППР для автоматизированного обнаружения, отслеживания и прогнозирования траекторий движения морских объектов на основе гибридного сочетания нейросетевых методов компьютерного зрения и алгоритмов фильтрации состояний.

Перспективность и значимость разработки СППР с компьютерным зрением для морского транспорта

Морской транспорт является одной из ключевых составляющих глобальной логистической инфраструктуры, обеспечивая более 80 % мирового товарооборота. Высокая степень сложности морской отрасли, обусловленная динамикой погодных условий, интенсивностью судоходства, разнообразием типов судов и ростом требований к безопасности и экологической устойчивости, формирует объективную необходимость внедрения интеллектуальных технологий. В этом контексте особое значение приобретает разработка СППР, интегрированных с технологиями компьютерного зрения, способных обеспечить более высокий уровень автоматизации, точности и оперативности управления морскими процессами [1-5].

Глобальный рынок систем компьютерного зрения в логистике и транспорте оценивается в \$12,5 млрд в 2023 году и продолжает расти со скоростью более 20% в год. К 2030 году более 70% крупных портов планируют внедрить системы автоматического распознавания объектов и видеомониторинга [6]. Прогнозируется, что мировой рынок ИИ в области компьютерного зрения вырастет с 30,22 млрд долларов США в 2025 году до 330,42 млрд долларов США к 2034 году, увеличиваясь среднегодовым темпом роста 30,58% (рис. 1).

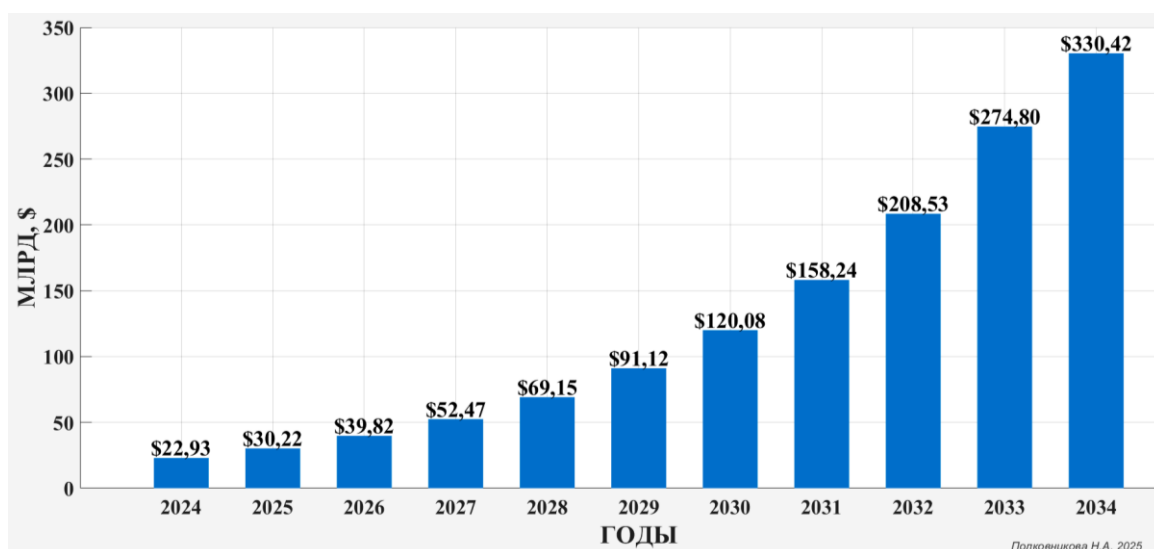


Рис.1. Объем и прогноз рынка ИИ в области компьютерного зрения на период с 2025 по 2034 год

Этот рост обусловлен растущим спросом на автоматизацию, достижениями в области глубокого обучения и расширением сферы применения в автомобильной промышленности, здравоохранении и потребительской электронике по всему миру.

На российском рынке доля морских решений на основе нейросетевых алгоритмов остаётся крайне низкой. Основное внимание в применении технологий компьютерного зрения сосредоточено на промышленной автоматизации, сельском хозяйстве, здравоохранении и логистике. В то же время в морской отрасли растёт потребность в системах визуального контроля, автоматической классификации объектов и интеллектуальных решениях для повышения безопасности и эффективности операций. Сдерживающими факторами являются отсутствие специализированных наборов данных, высокая стоимость внедрения и интеграции, а также дефицит специалистов, способных адаптировать решения компьютерного зрения к специфике судоходства. Кроме того, сложные условия эксплуатации, такие как повышенная влажность, слабое освещение и помехи, требуют устойчивых и адаптивных моделей.

Создание прикладных систем компьютерного зрения, адаптированных под задачи судоходства, становится важным и актуальным направлением, способствующим цифровизации и повышению безопасности в этой сфере. В условиях морской навигации это особенно важно, поскольку значительная часть информации о состоянии акватории, расположении судов, препятствиях, инфраструктуре и погодных условиях является визуальной по своей природе. Технологии компьютерного зрения позволяют автоматически распознавать объекты на поверхности воды, классифицировать их, определять расстояния и траектории движения, а также выявлять потенциальные риски в реальном времени.

Примеры реальных проектов:

1) Проект JRC × «K» LINE × YDK (Япония) – Integrated Navigation Support System. В 2021 г. компания Japan Radio Co., Ltd. (JRC) совместно с «K» LINE и YDK начал проект по созданию интегрированной навигационной системы поддержки

манёвров, использующей ИИ и другие современные технологии. Система обеспечивает распознавание образов, слияние сенсорных данных, анализ рисков и генерацию безопасных маршрутов.

2) MEGURI2040 (Япония) – программа «The Nippon Foundation MEGURI2040» полностью автономных судов, направленная на испытания навигации с полной автономностью.

3) Проект INNO2MARE (Европа) – пилотный проект по классификации морских состояний и обнаружению малых объектов с помощью стационарной камеры, не фиксируемых радаром и стандартными датчиками.

4) FOCUS EYE Project Vessel Image Recognition System (Япония) – система распознавания компании Mitsui O.S.K. Lines совместно с SenseTime Japan на борту судна «Nippon Maru», использующая глубокое обучение, камеры высокого разрешения и GPU-обработку для обнаружения малых судов, не регистрируемых через AIS («automatic identification system»), повышая надёжность визуального наблюдения («watch-keeping») особенно в ночное время или при плохой видимости.

5) Mayflower Autonomous Ship «AI Captain» (США, Великобритания) – проект автономного судна «Mayflower» с компьютерным зрением для обнаружения и классификации объектов: других судов, буёв, препятствий и мусора на воде.

Интеграция CV-модулей в СППР даёт возможность формировать более точные и обоснованные решения, учитывающие актуальные данные с видеокамер, дронов, спутников и береговых наблюдательных систем. Такие решения могут включать корректировку маршрутов, прогнозирование потенциальных столкновений, оптимизацию скоростного режима, оценку состояния портовой инфраструктуры и мониторинг окружающей среды.

Перспективность разработки СППР с компьютерным зрением определяется не только технологическим прогрессом, но и глобальными тенденциями морской отрасли. Повышение безопасности судоходства, минимизация экологических рисков, оптимизация логистических цепочек и внедрение автономных судов – все эти

задачи требуют новых подходов к анализу данных и принятию решений. СППР с компьютерным зрением, обладая способностью к самообучению, адаптации и обработке больших объёмов визуальной информации в реальном времени, создают основу для интеллектуальной морской навигации нового поколения.

Интенсивное развитие систем автономного судоходства приведёт к стандартизации систем

компьютерного зрения и появлению регламентов, касающихся требований к наборам данных, надёжности моделей, объяснимости решений и интерфейсам взаимодействия с оператором. В настоящее время сформированы международные организации, регулирующие правовые и нормативные аспекты внедрения и применения систем компьютерного зрения и ИИ в сфере морского транспорта и навигации (рис. 2).



Рис. 2. Международные организации в области морской стандартизации

Международная морская организация (International Maritime Organization, IMO) и Международная ассоциация классификационных обществ (International Association Of Classification Societies, IACS) подчёркивают важность

цифровизации морской отрасли, включая внедрение систем наблюдения, анализа и принятия решений с применением искусственного интеллекта (ИИ) и компьютерного зрения. Более полный список организаций представлен в таблице 1.

Таблица 1

Международные организации, регулирующие применение технологий ИИ и компьютерного зрения в морской отрасли

Аббревиатура / организация	Полное английское название	Полное русское название	Основные функции и роль
ISO/TC 8	International Organization for Standardization, Technical Committee No. 8 "Ships and Marine Technology"	Международная организация по стандартизации, Технический комитет № 8 «Суда и морские технологии»	Разработка международных стандартов в области судостроения, морских технологий и обеспечения безопасности судоходства.
IEC	International Electrotechnical Commission	Международная электротехническая комиссия	Стандартизация в области электрических, электронных и связанных технологий, включая морские системы автоматизации, навигации и связи.
IMO MASS Joint Working Groups	International Maritime Organization – Joint Working Groups on Maritime Autonomous Surface Ships	Совместные рабочие группы Международной морской организации по автономным судам	Разработка нормативно-правовых и технических требований к системам автономного судовождения (MASS), включая аспекты безопасности, ответственности и взаимодействия человека и машины.
BIMCO	Baltic and International Maritime Council	Балтийский и международный морской совет	Крупнейшая международная организация судовладельцев и операторов флота, занимающаяся разработкой контрактов, стандартов и рекомендаций по коммерческой эксплуатации судов.

Проведённый анализ показал, что международные организации, регулирующие применение технологий ИИ и компьютерного зрения в морской отрасли, осуществляют комплексное нормативно-методическое обеспечение процессов внедрения интеллектуальных систем в судоходство. Их деятельность направлена на разработку и актуализацию международных стандартов, процедур оценки соответствия, а также требований к безопасности и надёжности функционирования систем ИИ на морском транспорте. Ключевыми направлениями регламентирования являются обеспечение функциональной совместимости судовых систем, стандартизация методов испытаний и сертификации, определение принципов управления рисками и кибербезопасностью, а также формирование правовых основ эксплуатации автономных и интеллектуальных судов. Международные структуры, включая Международную морскую организацию (ИМО), Международную организацию по стандартизации (ISO), Международную электротехническую комиссию (IEC) и отраслевые ассоциации (BIMCO и др.), формируют единые требования к разработке, испытанию и эксплуатации систем ИИ, что обеспечивает согласованность подходов на международном уровне. Вырабатываемые этими организациями нормы и стандарты способствуют

повышению уровня безопасности судоходства, формированию доверия к интеллектуальным системам и созданию условий для их масштабного внедрения.

Исследование эволюции нейросетевых методов глубокого обучения

В настоящее время существует множество нейросетевых алгоритмов и архитектур для распознавания объектов на изображениях: SPP-net (Spatial Pyramid Pooling), R-CNN (Region-based Convolutional Neural Networks), Fast R-CNN, Faster R-CNN, Mask R-CNN, SSD (Single Shot MultiBox Detector), R-FCN (Region-based Fully Convolutional Network), YOLO и др. [7-14]. Нейросетевая архитектура YOLO является передовой нейросетью для распознавания объектов, главное преимущество которой является высокая скорость работы, что позволяет распознавать объекты в реальном времени. Свёрточная нейросетевая архитектура YOLO позволяет не только распознавать множество объектов на изображениях, но и в видеопотоке в режиме реального времени со скоростью распознавания 45 кадров в секунду. Исследование данных из открытых источников показало, что наиболее популярной свёрточной нейросетевой архитектурой в 2025 году является YOLOv5 (рис. 3).

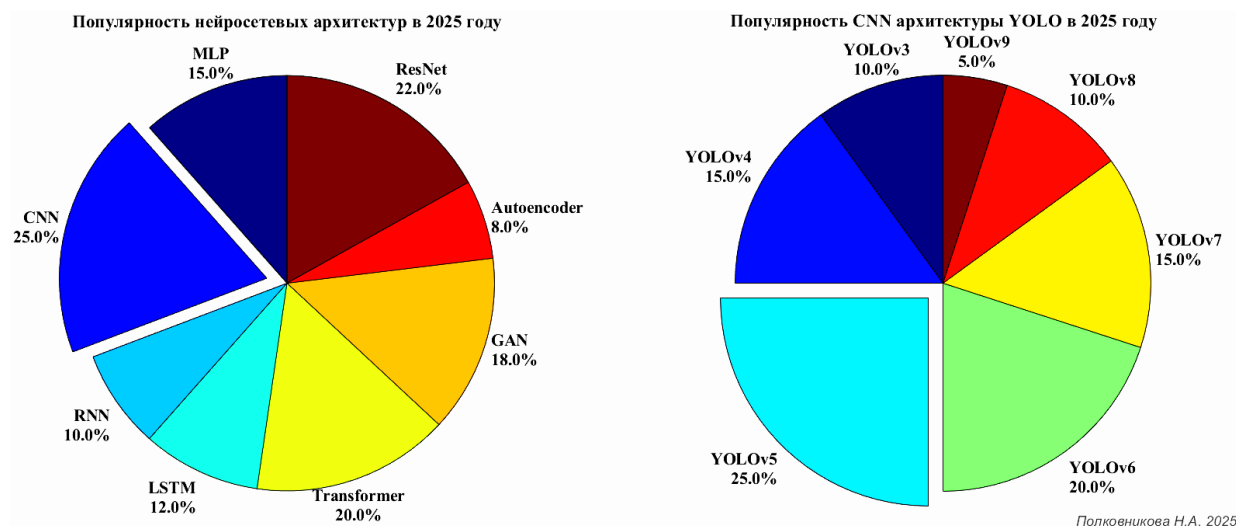


Рис. 3. Диаграммы популярности нейросетевых архитектур и CNN архитектуры YOLO различных версий в 2025 году

Развитие нейросетевой архитектуры YOLO («You Only Look Once») характеризуется последовательной оптимизацией структуры сети, методов обучения и механизмов детекции объектов, направленных на повышение точности, скорости обработки и устойчивости к различным условиям съёмки. Визуализация эволюции точности нейросетевой архитектуры YOLO представлена на рис. 4. Прогресс в точности демонстрирует экспоненциальный рост с каждым новым поколением YOLO отображается реальный прогресс точности на общепринятом международном эталонном наборе данных и

платформе оценки качества алгоритмов компьютерного зрения COCO («Common Objects in Context»). Реальный прогресс точности YOLO: от ~20% mAP (YOLOv1) до ~95% mAP (современные версии).

Первая версия YOLOv1 (2015 г.) представляла собой одностадийный детектор, в котором процесс локализации и классификации объектов выполнялся единой свёрточной сетью. Данный подход обеспечил высокую скорость работы, однако характеризовался недостаточной точностью при обнаружении мелких и перекрывающихся объектов.

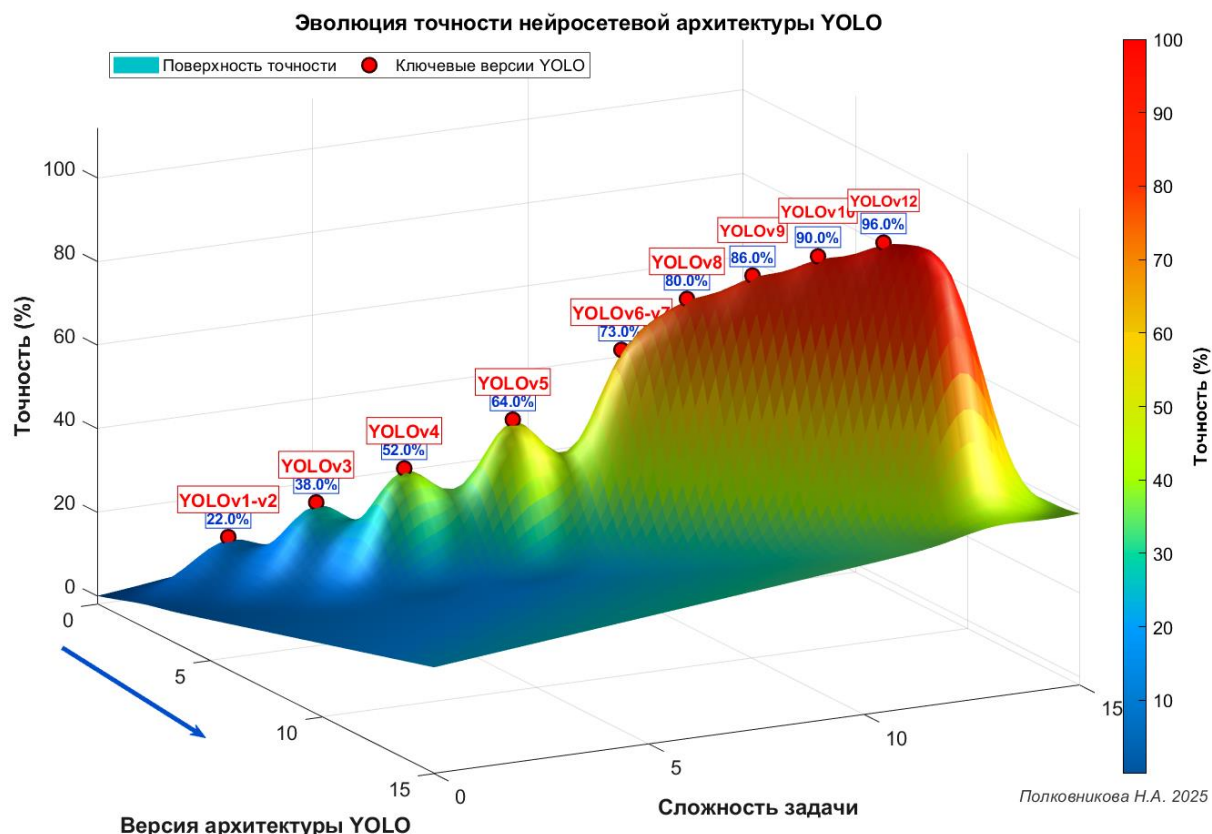


Рис. 4. Эволюция точности нейросетевой архитектуры YOLO

Архитектура YOLOv2 (YOLO9000) была усовершенствована за счёт введения якорных рамок (anchor boxes), нормализации batch normalization и использования более глубокого базового экстрактора признаков (Darknet-19). Это обеспечило повышение точности при сохранении высокой производительности. В YOLOv3 применён трёхуровневый детектор, использующий многомасштабное прогнозирование и усовершенствованную сеть Darknet-53 с остаточными связями (residual connections), что повысило устойчивость к вариациям размеров объектов и улучшило обобщающую способность модели.

Версия YOLOv4 объединила достижения предыдущих поколений с современными приёмами оптимизации: применены механизмы CSPNet («Cross Stage Partial Connections»), модули PANet для агрегации признаков, а также методы оптимизации обучения (Mosaic, DropBlock, Ciou loss), что привело к значительному росту точности без снижения скорости.

Современные версии, включая YOLOv9-YOLOv12, ориентированы на интеграцию принципов масштабируемости, гибридных архитектур и элементов внимания («attention mechanisms»). В них применяются принципы нейросетевых оптимизаций, таких как «Programmable Gradient Information» (PGI) и «Generalized Efficient Layer Aggregation Network» (GELAN), что обеспечивает баланс между вычислительной эффективностью и качеством детекции. Нейросетевая архитектура YOLOv12 (2025 г.) сочетает методы динамической адаптации фильтров, улучшенную пространственно-канальную

агрегацию и интеграцию трансформерных модулей, что позволяет достигать высокой точности при ограниченных ресурсах.

Таким образом, эволюция архитектуры YOLO демонстрирует переход от базовых одностадийных детекторов к гибридным высокоэффективным системам, объединяющим элементы классических свёрточных сетей и трансформерных подходов. Основным направлением развития остаётся достижение оптимального соотношения между скоростью, точностью и вычислительной сложностью, что делает YOLO одним из ключевых стандартов в области компьютерного зрения и детекции объектов в реальном времени [15-17].

Развитие нейросетевых архитектур в период с 1996 по 2025 г. характеризуется последовательной сменой парадигм – от простых многослойных перцептронов к гибридным интеллектуальным системам, сочетающим принципы глубокого обучения, внимания («attention») и самообучающихся моделей. Эволюция происходила в тесной связи с ростом вычислительных возможностей, развитием графических ускорителей (GPU), расширением объёмов данных и совершенствованием методов оптимизации.

На раннем этапе (1996-2005 гг.) основное развитие получили классические архитектуры искусственных нейронных сетей (ANN) и свёрточные нейронные сети (CNN), заложившие основу для обработки изображений. Работы Яна Лекуна и его коллег по архитектуре LeNet-5 (1998 г.) стали важным этапом, продемонстрировавшим возможность автоматического извлечения признаков из визуальных данных. Однако ограниченные

вычислительные ресурсы и небольшие объёмы размеченных данных сдерживали масштабное применение глубоких сетей.

В период 2013-2017 гг. наблюдался стремительный рост глубины и сложности архитектур. Были разработаны VGGNet (2014), GoogLeNet/Inception (2015) и ResNet (2015), реализовавшие концепции модульности, параллельной обработки признаков и остаточных связей («residual connections»). Эти решения позволили обучать чрезвычайно глубокие сети без деградации точности. В это же время началось активное развитие рекуррентных нейронных сетей (RNN) и долгосрочной памяти (LSTM, GRU), применяемых в задачах обработки естественного языка и временных рядов.

Период 2017-2020 гг. стал этапом перехода к архитектурам трансформеров («Transformers»), в которых реализован принципиально новый подход к обработке последовательностей, основанный на

механизмах самовнимания («self-attention»). С 2020 по 2025 гг. эволюция нейросетевых архитектур характеризуется переходом к мультифункциональным и унифицированным моделям, способным выполнять широкий спектр задач – от распознавания изображений до генерации текста и видео. Разрабатываются гибридные архитектуры, объединяющие свёрточные и трансформерные подходы (например, Vision Transformer, ConvNeXt, Swin Transformer), а также модели с адаптивными вычислениями и обучением с малым числом примеров. Появление моделей семейства YOLOv8-YOLOv12, DETR, Segment Anything Model (SAM) отражает тенденцию к объединению визуальных и языковых возможностей в рамках единой архитектуры. На рис. 5 представлена визуализация эволюции точности распознавания изображений нейросетевыми архитектурами (с 1996 по 2025 г с прогнозом до 2026 г).

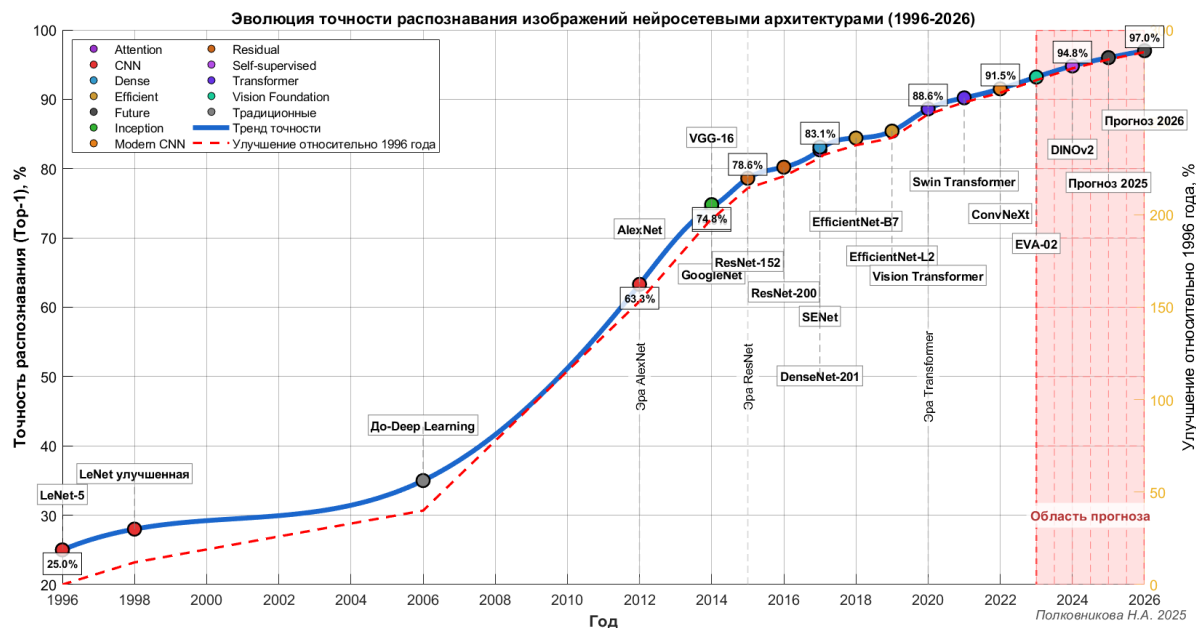


Рис. 5. Эволюция точности распознавания изображений нейросетевыми архитектурами

В таблице 2 представлена эволюция нейросетевых архитектур за 30 лет (с 1996 по 2025 гг.). Рост вычислительной сложности составил от 0,002 GFLOPs до 18,5 GFLOPs. По прогнозируемым

сведениям, на конец 2025 года вычислительная сложность составит 30,0 GFLOPs, а в 2026 году 35,0 GFLOPs.

Таблица 2

Эволюция нейросетевых архитектур

Год	Название нейросети	Вычислительная сложность	Точность, %	Ошибка, %	Датасет
1996	LeNet-5	0,002 GFLOPs	25,0	75,0	MNIST
1998	LeNet улучшенная	0,003 GFLOPs	28,0	72,0	MNIST
2012	AlexNet	0,7 GFLOPs	63,3	36,7	ImageNet
2014	VGG-16	15,5 GFLOPs	74,5	25,5	ImageNet
2014	GoogleNet	1,5 GFLOPs	74,8	25,2	ImageNet
2015	ResNet-152	11,3 GFLOPs	78,6	21,4	ImageNet
2016	ResNet-200	12,5 GFLOPs	80,2	19,8	ImageNet
2017	SENet	4,3 GFLOPs	82,7	17,3	ImageNet
2017	DenseNet-201	4,3 GFLOPs	83,1	16,9	ImageNet
2018	EfficientNet-B7	2,0 GFLOPs	84,4	15,6	ImageNet
2018	YOLOv3	65,9 GFLOPs	57,9	42,1	COCO

Год	Название нейросети	Вычислительная сложность	Точность, %	Ошибка, %	Датасет
2019	EfficientNet-L2	5,3 GFLOPs	85,4	14,6	ImageNet
2020	Vision Transformer	17,6 GFLOPs	88,6	11,4	ImageNet-21K
2020	YOLOv5	16-90 GFLOPs	63-72	28-37	COCO
2021	Swin Transformer	15,4 GFLOPs	90,2	9,8	ImageNet-21K
2022	ConvNeXt	15,0 GFLOPs	91,5	8,5	ImageNet-21K
2023	EVA-02	25,0 GFLOPs	93,2	6,8	LAION-2B
2024	DINOv2	18,5 GFLOPs	94,8	5,2	LVD-142M
2025	YOLOv12	≈ 220 GFLOPs для модели L	78,3	21,7	COCO
2025	Прогноз	30,0 GFLOPs	96,0	4,0	Multi-modal
2026	Прогноз	35,0 GFLOPs	97,0	3,0	Multi-modal

Таблица 2 показывает экспоненциальный рост точности нейросетевых архитектур с 25% до 97% за 30 лет. Вычислительная сложность возросла в 17500 раз (от 0,002 до 35 GFLOPs). Ключевые прорывы произошли в следующие годы:

- 2012: AlexNet – начало глубокого обучения;
- 2014-2015: VGG/ResNet – увеличение глубины сетей;
- 2020: Vision Transformer – революция архитектур;
- 2023-по настоящее время: флагманские модели на миллиардах изображений.

Таким образом, за тридцатилетний период как компьютерное зрение прошло путь от простых классификаторов цифр до почти человеческого уровня распознавания. Произошёл переход от локальных, специализированных архитектур к универсальным самообучающимся системам, обладающим свойствами адаптивности, масштабируемости и контекстного понимания. Эволюция нейросетевых моделей демонстрирует устойчивую направленность на интеграцию визуальных, языковых и когнитивных компонентов, что определяет современный этап развития ИИ как переход к многоагентным и мультидоменным архитектурам нового поколения.

Применение алгоритмов фильтрации состояний для повышения эффективности нейронных сетей

Нейросетевые модели детекции и отслеживания объектов обладают высокой точностью на отдельных кадрах, однако без учёта динамики движения они подвержены шуму и непоследовательности результатов. Интеграция фильтра Калмана позволяет рекурсивно оценивать состояние объектов, сглаживать траектории, прогнозировать позиции при временной потере наблюдений и повышать устойчивость системы к шумам и ошибкам детекции [18-21]. Таким образом, фильтр Калмана существенно повышает эффективность нейросетей в задачах отслеживания и прогнозирования движения объектов. В сочетании с нейросетью фильтр Калмана обеспечивает:

1. Сглаживание траекторий – уменьшает влияние шумов и случайных ошибок в детекции, формируя более непрерывное и реалистичное отслеживание движения объектов.
2. Прогнозирование положения объектов – позволяет нейросети предугадывать будущие позиции даже при временных потерях наблюдений.

3. Улучшение точности и надежности системы – фильтр Калмана интегрирует информацию о динамике объекта, что повышает устойчивость модели к артефактам и снижает количество ложных срабатываний.

Эффективность нейросетей в задачах отслеживания и прогнозирования движения напрямую зависит от применения фильтра Калмана, который обеспечивает временную когерентность, компенсацию шумов и корректировку прогнозирования, что невозможно достичь одной только нейросетевой детекцией. Фильтр Калмана работает как двухшаговый цикл на каждом временном шаге:

1. Прогнозирование (модель перехода в новое состояние) – на основе прошлой информации и модели движения вычисляется, где объект должен быть сейчас.
2. Обновление (модель измерений, наблюдение) – когда приходит новое измерение (например, с камеры), корректируется прогноз. Этот цикл повторяется постоянно, и с каждым шагом оценка становится точнее.

Рассмотрим математическую модель системы прогнозирования траектории движения объекта на основе фильтра Калмана. Состояние морского объекта описывается вектором:

$$X_k = \begin{bmatrix} x \\ y \\ v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

где x, y – координаты объекта (в метрах или широте/долготе, переведённой в метры или пиксели в системе координат), v_x, v_y – скорости (курс и ход) по осям x и y (м/с) на момент времени k .

За короткий промежуток времени движение можно считать равномерным (изменение скорости незначительно, путь изменяется почти линейно), тогда модель прогнозирования траектории движения объекта x от шага $k-1$ к k представляется в следующем виде:

$$x_k = Fx_{k-1} + w_{k-1} \quad (2)$$

где F – матрица динамики, описывающая движение объекта x :

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

а w_{k-1} – вектор процесса (модельная/процессная ошибка, модель шума процесса Q) с нулевым математическим ожиданием и ковариацией Q .

Ковариация показывает, насколько две случайных величины изменяются вместе. Например, если $\Delta t = 10$ с, то новые координаты объекта:

$$\begin{cases} x_{new} = x_{old} + v_x \cdot 10 \\ y_{new} = y_{old} + v_y \cdot 10 \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, при движении судна на восток со

скоростью 10 м/с через 10 секунд оно будет на 100 м дальше по оси X. Разработана программа в среде Matlab для визуального представления слежения и прогнозирования траектории судна с помощью фильтра Калмана (рис. 6).

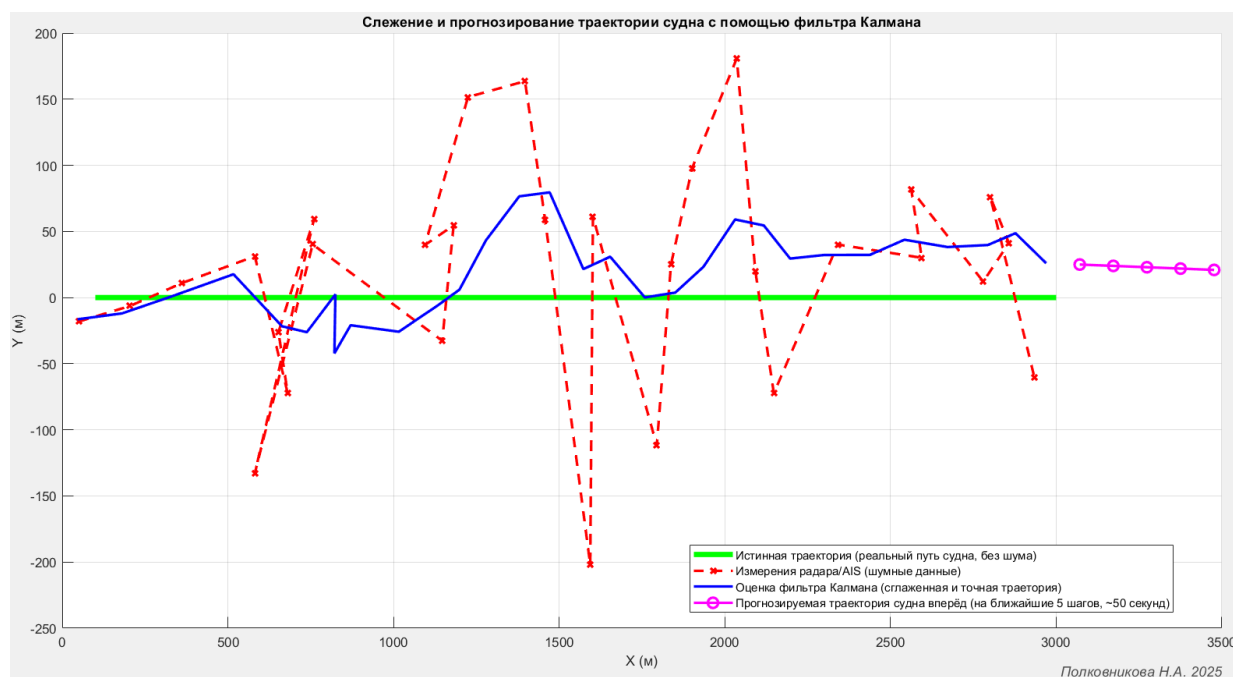


Рис. 6. Визуальное представление слежения и прогнозирования траектории судна с помощью фильтра Калмана

Полученные результаты показывают, что прогнозируемая траектория судна (на графике розовая линия с круглыми маркерами, прогноз на 5 шагов вперед) совпадает с истинной траекторией (реальный путь судна без шума) на графике линия зелёного цвета. Далее рассмотрим моделирование более реалистичного сценария, когда судно («sea-going vessel») может:

- менять курс (например, поворачивать);
- менять скорость (ускоряться или тормозить).

Для корректного функционирования фильтра Калмана в условиях изменяющихся характеристик движения объекта необходимо применять адаптивный подход, основанный на динамической перенастройке параметров модели в соответствии с текущим поведением объекта. Адаптивный фильтр Калмана используется, когда система может быть линейной или нелинейной, но ковариации шумов Q и R заранее неизвестны или изменяются во времени. Адаптивный фильтр Калмана:

- моделирует движение танкера с поворотом и изменением скорости судна;
- добавляет шумные измерения;
- подстраивает ковариацию шума процесса Q при обнаружении манёвров;
- строит реальную, измеренную, оценённую и прогнозируемую траектории.

Объект (морское судно) может вести себя по-разному: почти равномерно (CV), изменять скорость

(CA – constant acceleration), или выполнять поворот с постоянной угловой скоростью (СТ – coordinated turn). Адаптивность достигается двумя основными способами (или их сочетанием):

1. Адаптивная подстройка ковариации шума процесса Q (отражает насколько точно танкер следует своему курсу и скорости) и ковариации шума измерений R (насколько точно работают датчики) на основе инновации (ошибки прогнозирования измерения во времени).
2. Много-модельный подход (IMM) – параллельно запускаются несколько фильтров (CV, CA, СТ) и их выходы комбинируются с вероятностями моделей, которые адаптивно меняются. Фильтры бывают следующих видов:

- CV – «Constant Velocity»: движение с постоянной скоростью $[x, y, vx, vy]$;
- CA – «Constant Acceleration»: движение с постоянным ускорением $[x, y, vx, vy, ax, ay]$;
- СТ – «Coordinated Turn»: согласованный поворот $[x, y, vx, vy, \omega]$.

Результат визуализации адаптивного фильтра Калмана для слежения и прогнозирования траектории судна при повороте и применения одновременно трёх фильтров (CV, CA, СТ) с адаптивной подстройкой R (шум измерений) и интерактивным сравнением ошибок фильтров в реальном времени реализован в виде программы в среде Matlab (рис. 7).

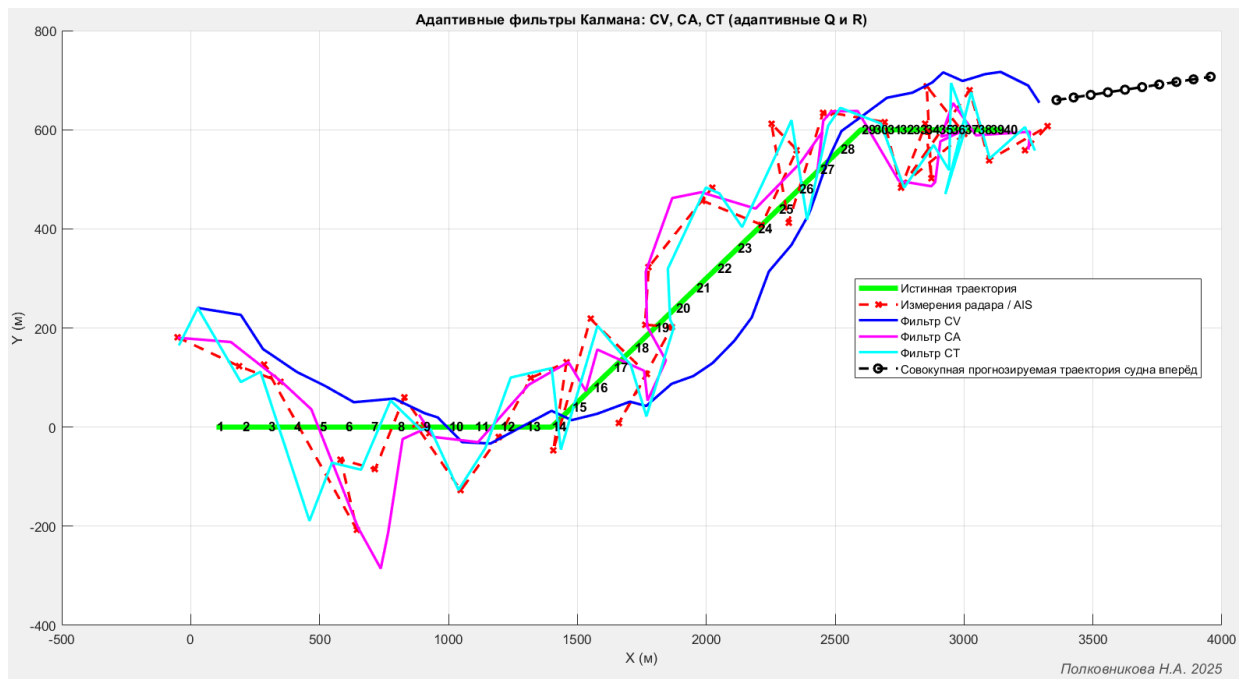


Рис. 7. Визуальное представление слежения и прогнозирования траектории судна с помощью адаптивного фильтра Калмана

В моделировании представлены следующие манёвры судна: на 14-м шаге судно поворачивает на северо-восток; на 29-м шаге замедляется и возвращается на восточный курс. Совокупная прогнозируемая траектория судна вперёд реализована для 10 шагов. Для каждого фильтра вычисляется инновация $y = z - Hx_{\text{pred}}$. Затем производится сравнение её нормы с порогом. Если инновация слишком большая, то увеличиваем Q и уменьшаем доверие к измерению, увеличивая R . Если инновация небольшая, то используем базовые значения Q и R . Таким образом, адаптивный фильтр Калмана:

- 1) анализирует «инновацию» (разницу между измерением и прогнозом). При этом оценка остаётся точной даже при манёврах;
- 2) фильтр не запаздывает при изменении курса или скорости. Если ошибка резко выросла, то считает, что судно маневрирует, и увеличивает шум модели Q ;
- 3) прогноз траектории вперёд становится реалистичнее, заставляет фильтр больше доверять новым данным и быстрее «перестраиваться» под новое движение.

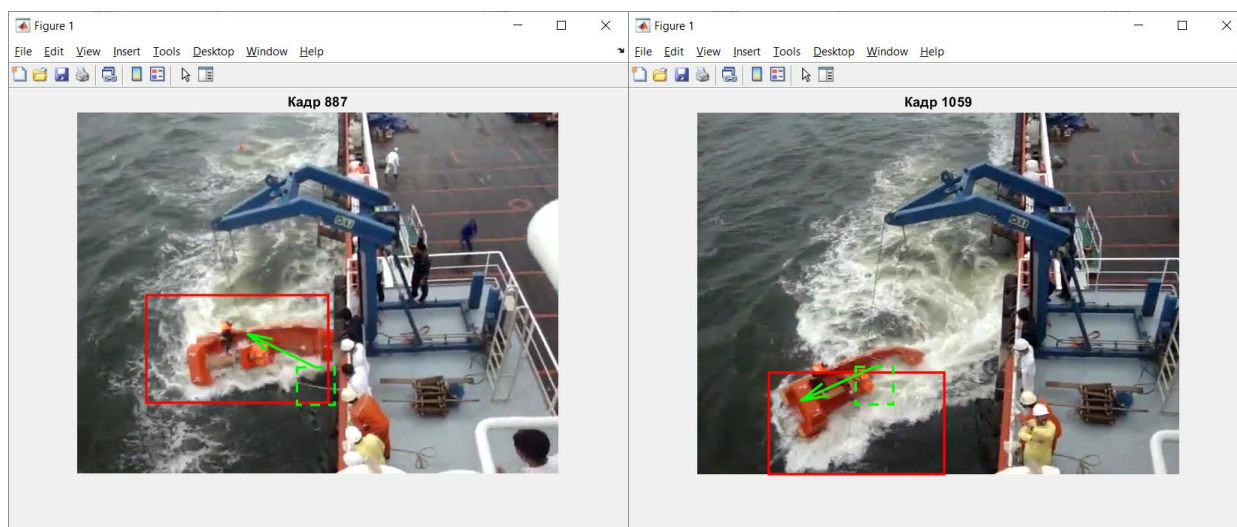
Адаптивный фильтр Калмана используется в морских системах мониторинга и в системах прогнозирования движения судов (например, для предотвращения столкновений). Такие прогнозы широко применяются в:

- системах VTS («Vessel Traffic Services») для прогнозирования точки сближения судов;
- автоматических системах управления движением в портах;
- аналитике для предупреждения столкновений и построения оптимальных маршрутов.

Фильтр Калмана не предназначен для самостоятельного (первичного) обнаружения движущихся объектов в видеопотоке, а выполняет задачу отслеживания (сопровождения) уже идентифицированных объектов и их траекторий. Его основная функция заключается в оценке текущего состояния системы и прогнозировании последующих состояний на основе априорной модели движения и ранее полученных измерений. Для задач слежения за объектом и прогнозирования траектории движения объекта в видеопотоке фильтр Калмана можно настроить двумя способами:

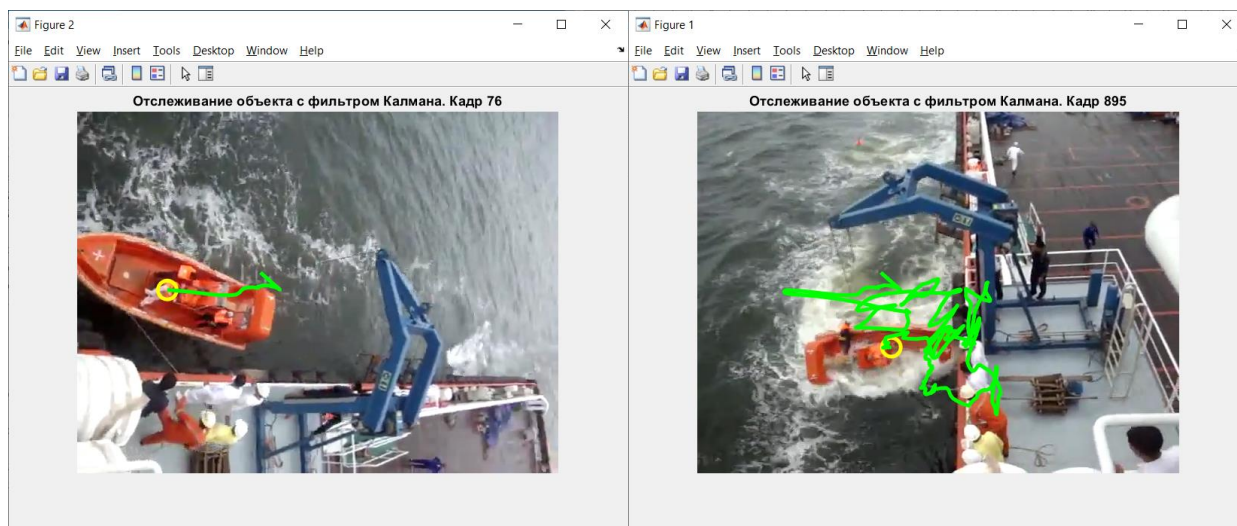
- 1) обнаружение по цвету (маска по HSV или RGB);
- 2) обнаружение по движению (вычитание фона, optical flow).

Для исследования возможностей настройки фильтр Калмана в видеопотоке разработана программа в среде Matlab. На рис. 8 представлены результаты работы программы на основе фильтра Калмана для обнаружения и слежения за движением объекта по цвету (цветовой маске) в видеопотоке.



а) обнаруженный объект в красном прямоугольнике

б) прогнозирование траектории (зелёная стрелка)



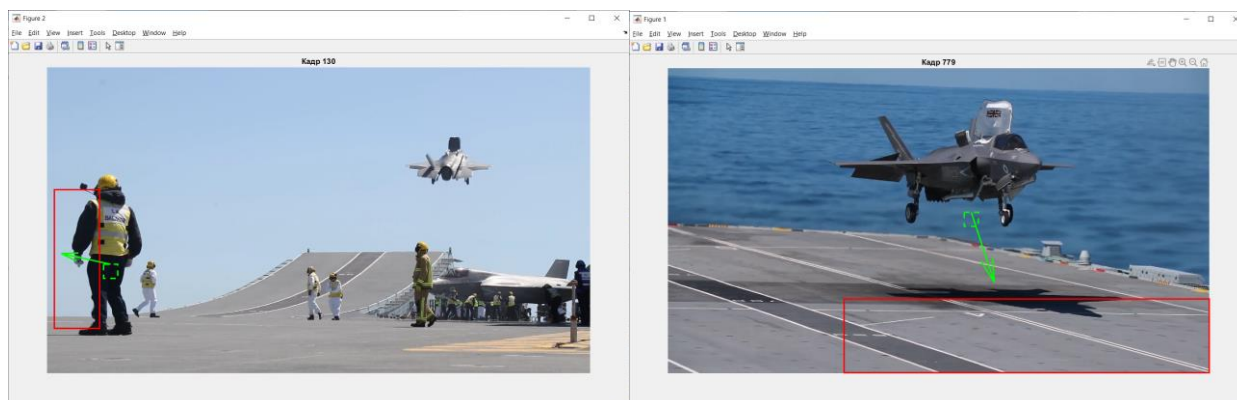
в) обнаружение центра объекта (желтый круг)

г) траектория движения объекта (зелёная кривая)

Рис. 8. Результаты работы программы на основе фильтра Калмана для отслеживания движения объекта по цвету

На рис. 9 представлены результаты работы программы на основе фильтра Калмана методом обнаружения по движению (вычитание фона) в видеопотоке. Недостаток использования фильтра

Калмана методом вычитания фона: происходит выделение области с изменением яркости (тень самолёта), а не сам объект (рис. 9б).



а) корректная работа алгоритма

б) некорректная работа алгоритма

Рис. 9. Результаты работы программы на основе фильтра Калмана методом обнаружения по движению

Тень самолёта создаёт относительное изменение яркости или цвета фона, которое алгоритм воспринимает как «движущийся объект». Фильтр Калмана получает координаты этой тени как измерение положения объекта и начинает предсказывать её движение, а не самого самолёта. Намного более эффективным подходом является сочетание нейросетевого детектора с фильтром Калмана. Рассмотрим математическую модель прогнозирования движения объекта, где нейросеть YOLO даёт измерения (детекции), а адаптивный фильтр Калмана – оценку и прогноз состояния. Нейросеть YOLO на кадре k выдаёт набор детекций $\mathcal{D}_k = \{d_k^{(n)}\}$. Одна детекция $d = (b, c, f)$, где:

$b = (x_b, y_b, w_b, h_b)$ – ограничивающий прямоугольник (bounding box, bbox, где x_b, y_b – координаты центра прямоугольника (x_b – горизонтальная позиция, y_b – вертикальная), w_b – ширина, h_b – высота), c – класс объекта,

$f \in [0, 1]$ – коэффициент уверенности в том, что в ограничивающем прямоугольнике находится объект.

Из ограничивающего прямоугольника извлекаем наблюдаемое положение в кадре k :

$$z^k = \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \end{bmatrix} + v^k, \quad (5)$$

где v^k – шум измерения. В реальной системе измерения не идеальны: положение ограничивающего прямоугольника может быть неточным из-за ошибок нейросети, движения объекта, размытия и т.д. Поэтому производится моделирование этой неопределённости как случайную величину с нормальным распределением:

$$v^k \sim \mathcal{N}(0, R^k(f)), \quad (6)$$

где $\mathcal{N}(0, R^k(f))$ означает, что v^k распределён по многомерному нормальному закону с:

- математическим ожиданием (средним) 0;
- ковариационной матрицей $R^k(f)$, которая задаёт, насколько сильно шум может отклоняться по каждой координате и как

связаны эти отклонения между собой.

$R^k(f)$ – ковариационная матрица шума, которая описывает, насколько ненадежно измерение и уменьшается при увеличении уверенности f , что делает фильтр адаптивным.

Затем выполняется обновление оценки состояния судна адаптивным фильтром Калмана:

$$\begin{cases} x^k = x^{k|k-1} + K^k(z^k - Hx^{k|k-1}), \\ P^k = (I - K^k H)P^{k|k-1}, \end{cases} \quad (7)$$

где: K^k – Калмановский коэффициент усиления, H – матрица наблюдения (выбирает из x^k только координаты), P^k – ковариация ошибки оценки.

Разработана программа, совмещающая работу адаптивного фильтра Калмана с модифицированной нейросетью YOLO v11 для решения задач обнаружения, слежения и прогнозирования траектории движения морских объектов. При модификации нейросети YOLO v11 произведена корректировка детектора (detection head), улучшение функции потерь, добавление весовых коэффициентов внимания (attention modules) и адаптация структуры карты признаков (feature map). Реализация программы выполнена на языке программирования Python в среде Microsoft Visual Code. Выполнена настройка параметров и модификация нейросети. Реализован модифицированный метод, основанный на объединении этапа обнаружения нейросетью YOLO v11 с прогнозированием траектории движения адаптивным фильтром Калмана в видеопотоке.

На рис. 10 представлены результаты работы программы на примере видео «Carrier Strike Group in the South China Sea». Реализованная программа осуществляет кадровый анализ загруженного видеопотока, выполняя выделение обнаруженных морских объектов в ограничивающие прямоугольники с коэффициентом уверенности и прогнозированием траектории движения в виде векторных стрелок.



а) слежение за морскими объектами: движение от камеры



б) слежение за морскими объектами: движение к камере

Рис. 10. Результаты работы программы обнаружения и прогнозирования траектории движения морских объектов

Таким образом, модифицированная нейросеть YOLO v11 выполняет обнаружение объектов (получает местоположение объектов на каждом кадре), а фильтр адаптивный Калмана использует эти данные для отслеживания объектов в пространстве и времени, корректируя их траекторию и прогнозируя будущие положения на основе предыдущих наблюдений.

Заключение

Разработка СППР с компьютерным зрением представляет собой стратегическое направление цифровой трансформации морского транспорта. Нейросетевые методы в судоходстве имеют большой потенциал применения на безэкипажных судах. Внедрение систем компьютерного зрения на базе нейросетевых архитектур в судоходную отрасль позволяет автоматизировать процессы визуального контроля, повысить безопасность и снизить зависимость от человеческого фактора. Применение гибридного подхода на основе сочетания нейронных сетей с традиционными методами, адаптированными к задачам морского мониторинга, соответствует современным тенденциям в ИИ и транспортной автоматизации.

Выполнено комплексное исследование эволюции современных архитектур нейронных сетей на специально разработанном уникальном наборе данных. При разработке прототипа СППР применены различные методы предварительной обработки и аугментации данных, а также оптимальные подходы к обучению нейронных сетей в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Анализ производительности работы алгоритмов в реальных условиях позволяет сделать выводы о практической применимости разработанных решений.

Разработано программное обеспечение в виде прототипа СППР, реализующее алгоритмы

компьютерного зрения на базе модифицированной нейросетевой архитектуры YOLO v11 с алгоритмом фильтрации состояний (адаптивный фильтр Калмана) для обнаружения, слежения и прогнозирования движения морских объектов. Разработанная программа поддерживает работу с изображениями, видео и видеопотоком реального времени с камеры.

При разработке прототипа СППР решены следующие задачи:

1. Исследованы алгоритмы фильтрации состояний для повышения эффективности нейронных сетей на основе адаптивного фильтра Калмана в различных режимах и условиях прогнозирования траектории движения.
2. Исследованы методы визуального анализа и принципы работы современных нейросетевых архитектур, применяемых для задач обнаружения объектов.
3. Разработана модифицированная нейросетевая архитектура YOLO v11 для обнаружения морских объектов. При модификации нейросети YOLO v11 произведена корректировка детектора (detection head), улучшение функции потерь, добавление весовых коэффициентов внимания (attention modules) и адаптация структуры карты признаков (feature map).
4. Реализован алгоритм фильтрации состояний для слежения и прогнозирования движения морских объектов на основе адаптивного фильтра Калмана.
5. Разработан прототип СППР, совмещающий работу адаптивного фильтра Калмана с модифицированной нейросетью YOLO v11 для решения задач обнаружения, слежения и прогнозирования траектории движения морских объектов в видеопотоке.

Литература

1. Шаров С.А. Искусственный интеллект в морской отрасли и его регулирование международным правом. Океанский менеджмент. – 2024, №1 (24). – С. 43-46.

2. Комендантов К.И. Правовые аспекты использования искусственного интеллекта в международных морских спасательных операциях. Океанский менеджмент. – 2024, №1 (24). – С. 35-39.
3. Белоусова О., Криницкий М.А., Погожева М.П. Современные средства и методы мониторинга плавающего морского макромусора и внедрение технологий машинного обучения. Океанологические исследования. – 2024, Т. 52., № 4. – С. 243-268.
4. Станкевич Т.С. Перспективы применения искусственных нейронных сетей для обеспечения безопасности морского транспорта. Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития. – 2024, №VI. – С. 120-123.
5. Пятакович В.А., Рычкова В.Ф., Филиппов Е.Г. Нейронные сети как вариант вычислительной структуры системы классификации морских целей. Морские интеллектуальные технологии. – 2020, № 1-2. – С. 163-174.
6. AI in Computer Vision Market Driving Next-Gen Automation Across Industries <https://www.precedenceresearch.com/ai-in-computer-vision-market> (дата обращения: 30.09.2025)
7. Lorencin I. et al. Marine objects recognition using convolutional neural networks. Naše More: znanstveni časopis za more i pomorstvo. – 2019, Т. 66, № 3. – pp. 112-119.
8. Baig M.D., Haq H.B.U. Marine Object Detection using YOLOv4 Adapted Convolutional Neural Network. Decision Making Advances. – 2024., Т. 2., №1. – pp. 83-91.
9. Mathias A. et al. Deep Neural Network Driven Automated Underwater Object Detection. Computers, Materials & Continua. – 2022, Т. 70, № 3. – pp. 5251-5267.
10. Zhang R. et al. Survey on Deep Learning-Based Marine Object Detection. Journal of Advanced Transportation. – 2021, Т. 2021, №1. – С. 5808206.
11. Schöller F.E.T. et al. Vision-based object tracking in marine environments using features from neural network detections. IFAC-PapersOnLine. – 2020., Т. 53. – №. 2. – С. 14517-14523.
12. Shao Z. et al. Multi-scale object detection model for autonomous ship navigation in maritime environment. Journal of Marine Science and Engineering. – 2022, Т. 10. – №. 11. – С. 1783.
13. Choi J. et al. Polaris dataset: A maritime object detection and tracking dataset in pohang canal. 2025 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2025. – pp. 13626-13632.
14. Rekavandi A.M. et al. A guide to image-and video-based small object detection using deep learning: case study of maritime surveillance. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2025. <https://arxiv.org/pdf/2207.12926> (дата обращения: 30.09.2025)
15. Din M. U. et al. Benchmarking vision-based object tracking for USVs in complex maritime environments. IEEE Access. – 2025. – pp. 15014-15027.
16. Adžemović M. et al. Beyond Kalman filters: deep learning-based filters for improved object tracking. Machine Vision and Applications. – 2025, Т 36, №1. – <https://arxiv.org/pdf/2411.06378> (дата обращения: 30.09.2025)
17. Wu C.M. et al. Unmanned Ship Identification Based on Improved YOLOv8s Algorithm. Computers, Materials & Continua. – 2024, Т. 78, №3. – pp. 3071-3088.
18. Тихонов М.А., Полковникова Н.А. Разработка нейросетевой системы поддержки принятия решений для отслеживания и прогнозирования движения объектов в режиме реального времени. Эксплуатация морского транспорта. Гос. морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск. – 2024, №2(111). – С. 210-221.
19. Полковникова Н.А. Нейросетевые системы автоматического распознавания морских объектов. Эксплуатация морского транспорта. Гос. морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск. – 2020, №1(94). – С. 207-219.
20. Полковникова Н.А. Исследование методов и алгоритмов компьютерного зрения на основе свёрточных и рекуррентных нейронных сетей. Эксплуатация морского транспорта. Гос. морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск. – 2020, №3(96). – С. 154-168.
21. Полковникова Н.А., Тузинкевич Е.В., Попов А.Н. Применение свёрточных нейронных сетей для мониторинга морских объектов. Морские интеллектуальные технологии. – 2020, №4(50). – С. 53-61.

References

1. Sharov S.A. Iskusstvennyy intellekt v morskoy otrasli i ego regulirovanie mezhdunarodnym pravom [Artificial intelligence in the marine industry and its regulation by international law]. Okeanskiy menedzhment. – 2024, №1 (24). – S. 43-46.
2. Komendantov K.I. Pravovye aspekty ispol'zovaniya iskusstvennogo intellekta v mezhdunarodnykh morskikh spasatel'nykh operatsiyakh [Legal aspects of the use of artificial intelligence in international maritime search and rescue operations]. Okeanskiy menedzhment. – 2024, №1 (24). – S. 35-39.
3. Belousova O., Krinickij M.A., Pogozheva M.P. Sovremennye sredstva i metody monitoringa plavayushchego morskogo makromusora i vnedrenie tekhnologiy mashinnogo obucheniya [Modern means and methods for monitoring floating marine macro debris and the implementation of machine learning technologies]. Okeanologicheskie issledovaniya. – 2024, Т. 52, №4. – S. 243-268.
4. Stankevich T.S. Perspektivy primeneniya iskusstvennykh neyronnykh setey dlya obespecheniya bezopasnosti morskogo transporta [Prospects for the application of artificial neural networks to ensure the safety of maritime transport]. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya. – 2024, №VI. – S. 120-123.
5. Pjatakovich V.A., Rychkova V.F., Filippov E.G. Neyronnye seti kak variant vychislitel'noy struktury sistemy klassifikatsii morskikh tseley [Neural networks as an option for the computational structure of a system for classification of maritime targets]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2020, №1-2. – S. 163-174.

6. AI in Computer Vision Market Driving Next-Gen Automation Across Industries <https://www.precedenceresearch.com/ai-in-computer-vision-market> (data obrashheniya: 30.09.2025)
7. Lorencin I. et al. Marine objects recognition using convolutional neural networks. Naše More: znanstveni časopis za more i pomorstvo. – 2019, T. 66, № 3. – pp. 112-119.
8. Baig M.D., Haq H.B.U. Marine Object Detection using YOLOv4 Adapted Convolutional Neural Network. Decision Making Advances. – 2024., T. 2., №1. – pp. 83-91.
9. Mathias A. et al. Deep Neural Network Driven Automated Underwater Object Detection. Computers, Materials & Continua. – 2022, T. 70, № 3. – pp. 5251-5267.
10. Zhang R. et al. Survey on Deep Learning-Based Marine Object Detection. Journal of Advanced Transportation. – 2021, T. 2021, №1. – S. 5808206.
11. Schöller F.E.T. et al. Vision-based object tracking in marine environments using features from neural network detections. IFAC-PapersOnLine. – 2020., T. 53. – №. 2. – S. 14517-14523.
12. Shao Z. et al. Multi-scale object detection model for autonomous ship navigation in maritime environment. Journal of Marine Science and Engineering. – 2022, T. 10. – №. 11. – S. 1783.
13. Choi J. et al. Polaris dataset: A maritime object detection and tracking dataset in pohang canal. 2025 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2025. – pp. 13626-13632.
14. Rekavandi A.M. et al. A guide to image-and video-based small object detection using deep learning: case study of maritime surveillance. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2025. <https://arxiv.org/pdf/2207.12926> (data obrashheniya: 30.09.2025)
15. Din M. U. et al. Benchmarking vision-based object tracking for USVs in complex maritime environments. IEEE Access. – 2025. – pp. 15014-15027.
16. Adžemović M. et al. Beyond Kalman filters: deep learning-based filters for improved object tracking. Machine Vision and Applications. – 2025, T 36, №1. – <https://arxiv.org/pdf/2411.06378> (data obrashheniya: 30.09.2025)
17. Wu C.M. et al. Unmanned Ship Identification Based on Improved YOLOv8s Algorithm. Computers, Materials & Continua. – 2024, T. 78, №3. – pp. 3071-3088.
18. Tihonov M.A., Polkovnikova N.A. Razrabotka nejrosetevoj sistemy podderzhki prinjatija reshenij dlja otslezhivaniya i prognozirovaniya dvizheniya ob'ektov v rezhime real'nogo vremeni [Development of a neural network decision support system for tracking and forecasting the movement of objects in real time]. Jekspluatacija morskogo transporta. Gos. morskoy universitet im. admirala F.F. Ushakova, Novorossiysk. – 2024, № 2 (111). – S. 210-221.
19. Polkovnikova N.A. Nejrosetevye sistemy avtomaticheskogo raspoznavaniya morskikh ob'ektov [Neural network systems for automatic recognition of marine objects]. Jekspluatacija morskogo transporta. Gos. morskoy universitet im. admirala F.F. Ushakova, Novorossiysk. – 2020, № 1 (94). – S. 207-219.
20. Polkovnikova N.A. Issledovanie metodov i algoritmov komp'yuternogo zreniya na osnove svjortochnyh i rekurrentnyh nejronnyh setej [Research on methods and algorithms of computer vision based on convolutional and recurrent neural networks]. Jekspluatacija morskogo transporta. Gos. morskoy universitet im. admirala F.F. Ushakova, Novorossiysk. – 2020, № 3 (96). – S. 154-168.
21. Polkovnikova N.A., Tuzinkevich E.V., Popov A.N. Primenenie svjortochnyh nejronnyh setej dlja monitoringa morskikh ob'ektov [Application of convolutional neural networks for monitoring marine objects]. Morskoe intellektual'nye tehnologii. – 2020, № 4 (50). – S. 53-61.

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

Полковникова Наталья Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Радиоэлектроника и информационные технологии», Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: natalia-polkovnikova@mail.ru

Natalia A. Polkovnikova, Ph.D. (Eng), assistant professor of Radio engineering and information technologies department, Admiral F.F. Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, Lenin's avenue, 93, e-mail: natalia-polkovnikova@mail.ru

Полковников Анатолий Карпович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Эксплуатация судовых механических установок», Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: polkov5@mail.ru

Anatoly K. Polkovnikov, Ph.D. (Eng), assistant professor of Operation of ship mechanical installations department, Admiral F.F. Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, Lenin's avenue, 93, e-mail: polkov5@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 18.11.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.01.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 11.02.2026.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Научная статья

УДК 656.6.058;681.323

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.028>

Алгоритм диагностики деградации и ресурсного прогнозирования для судовых экологических систем

Скороходов Д.А.¹ skorohodda@mail.ru, Каминский В.Ю.¹ Kaminskyvy@yandex.ru

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. В статье предложен метод неразрушающего мониторинга динамики параметров состояния судовых систем экологической безопасности в эксплуатационных условиях, обеспечивающий прогнозирование остаточного ресурса оборудования без его демонтажа. Обоснована необходимость комплексного подхода к проектированию систем технической диагностики, включая оптимизацию количества, типов и приоритетности диагностических параметров, установление эталонных значений и допустимых отклонений, а также определение областей работоспособности оборудования и требуемой точности измерений. Разработана математическая модель, базирующаяся на методе малых отклонений для линеаризации уравнений связи косвенных величин, что позволяет идентифицировать оптимальную группу измеряемых параметров и их метрологические характеристики. В качестве критериев оптимизации при синтезе диагностических систем предложены: минимизация стоимости измерительных процедур, максимизация эффективности диагностики (вероятности обнаружения отказов) и достижение заданной точности контроля. Погрешности измерений формализованы в виде линейной функции потерь, учитывающей экономические и эксплуатационные риски. Результаты исследования обеспечивают теоретическую основу для создания интеллектуальных систем мониторинга, способных своевременно выявлять деградацию оборудования, предотвращать аварийные ситуации с экологическими последствиями и повышать ресурсную эффективность судовых технических средств. Разработанный подход позволяет в реальном времени оценивать деградацию функциональных характеристик оборудования без его демонтажа, а также прогнозировать остаточный ресурс на основе анализа дрейфа диагностических параметров относительно эталонных значений, регламентированных стандартами.

Ключевые слова: судовые системы экологической безопасности, неразрушающая техническая диагностика, прогнозирование остаточного ресурса, системы очистки балластных вод, мониторинг выбросов вредных веществ, метрологическая оптимизация измерений, автоматизированный контроль герметичности.

Финансирование: работа выполнена в рамках исполнения государственного задания ИПТ РАН № 075-00605-26-00 на 2026 год и на плановый период 2027 и 2028 годов за счет средств предоставленной Минобрнауки России субсидии (Соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 20.01.2026 № 075-03-2026-498).

Для цитирования: Скороходов Д.А., Каминский В.Ю. Алгоритм диагностики деградации и ресурсного прогнозирования для судовых экологических систем, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 276—282. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.028.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.028>

The algorithm of degradation diagnostics and resource forecasting for marine ecological systems

Dmitriy A. Skorokhodov¹ skorohodda@mail.ru, Valery Yu. Kaminsky¹ Kaminskyvy@yandex.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences

Abstract. The article proposes a method for non-destructive monitoring of the dynamics of the parameters of the ship's environmental safety systems under operating conditions, which ensures forecasting the remaining life of the equipment without dismantling it. The necessity of an integrated approach to the design of technical diagnostics systems is substantiated, including optimizing the number, types and priority of diagnostic parameters, setting reference values and permissible deviations, as well as determining the areas of equipment operability and the required measurement accuracy. A mathematical model based on the small deviation method has been developed for linearization of the equations of coupling of indirect quantities, which makes it possible to identify the optimal group of measured parameters and their metrological characteristics. The following optimization criteria are proposed for the synthesis of diagnostic systems: minimizing the cost of measurement procedures, maximizing diagnostic efficiency (probability of failure detection) and achieving a given control accuracy. Measurement errors are formalized as a linear loss function that takes into account economic and operational risks. The research results provide a theoretical basis for the creation of intelligent monitoring systems capable of timely detecting equipment degradation, preventing emergencies with environmental consequences, and increasing the resource efficiency of shipboard equipment. The

developed approach makes it possible to assess the degradation of the functional characteristics of the equipment in real time without dismantling it, as well as predict the remaining resource based on the analysis of the drift of diagnostic parameters relative to the reference values regulated by the standards.

Keywords: marine environmental safety systems, non-destructive engineering diagnostics, residual resource forecasting, ballast water treatment systems, monitoring of emissions of harmful substances, metrological optimization of measurements, automated leak proofness control.

Financial Support: the work was carried out under the state assignment of the IPT RAS № 075-00605-26-00 for 2026 and the planned period of 2027 and 2028 funded by a subsidy provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement on the provision of subsidies from the federal budget for financial support for the implementation of the state task dated 20 January 2026 № 075-03-2026-498).

For citation: Dmitriy A. Skorohodov, Valery Yu. Kaminsky, The algorithm of degradation diagnostics and resource forecasting for marine ecological systems, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 276—282. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.028.

Введение

Техническая диагностика судовых систем экологической безопасности, включая установки очистки балластных вод, комплексы нейтрализации вредных выбросов и системы утилизации нефтесодержащих отходов, направлена на неразрушающий мониторинг динамики их параметров в эксплуатационных условиях и прогнозирование остаточного ресурса оборудования [1–6]. Достоверная оценка технического состояния требует сопоставления измеренных значений с эталонными характеристиками, регламентированными стандартами IMO и ГОСТ Р 57189-2016, либо с границами области работоспособности, определённой методами теории надёжности. При выявлении отказов применяются алгоритмы локализации неисправностей, эффективность которых напрямую зависит от точности диагностических измерений и метрологической согласованности данных [7–9].

Разработка систем диагностики предполагает научное обоснование иерархии параметров по их информативности и влиянию на экологическую безопасность, установление номинальных значений и предельно допустимых отклонений, формализацию функциональных границ работоспособности оборудования, а также оптимизацию метрологических характеристик измерительных процедур. Критерием выбора параметров служит их способность обеспечивать достоверность оценки текущего состояния системы при минимизации эксплуатационных затрат. Интеграция этих аспектов в единую модель позволяет создать систему контроля, соответствующую требованиям MARPOL 73/78, снижающую риски экологических инцидентов и гарантирующую ресурсную эффективность судового оборудования.

Оптимизация измерений в диагностике судовых систем экологической безопасности

Выбор оптимальной измерительной стратегии в системах технической диагностики направлен на формирование рационального набора диагностических параметров и обоснование их метрологических характеристик, обеспечивающих минимизацию дисперсии оценки технического состояния судового экологического оборудования. Оптимизация проводится с учётом критериев точности, экономической эффективности и соответствия требованиям международных стандартов (MARPOL 73/78, ISO 13379-1: 2025), где ключевым показателем является вероятность

своевременного обнаружения деградации функциональных характеристик систем очистки выбросов и балластных вод.

Математическая модель функционирования оборудования строится на основе физических законов сохранения массы, энергии и импульса, дополненных экспериментальными данными и результатами численного моделирования (CFD-анализ, метод конечных элементов). Для формализации диагностической задачи проводится инвентаризация динамических переменных состояния $x_i (i = 1, \dots, n)$, подверженных дрейфу в эксплуатационных условиях. Связи между ними описываются системой нелинейных уравнений:

$$f_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0; \quad (j = 1, 2, \dots, h), \quad (1)$$

где: n – определяет количество переменных величин, а число h – количество связывающих эти величины уравнений.

Для обеспечения разрешимости системы из h уравнений вида (1) относительно всех n переменных необходимо выделить $k = n - h$ независимых параметров, подлежащих прямому измерению. Данный выбор определяется рангом матрицы Якоби системы уравнений (1) и гарантирует однозначную оценку остальных h переменных косвенным методом. Пусть выбрана группа из k измеряемых параметров $p_i (i = 1, \dots, k)$, которые в метрологической практике именуются факторами или независимыми переменными. Оставшиеся h величин, обозначаемые как $y_j (j = 1, \dots, h)$, определяются как зависимые переменные (отклики), вычисляемые по результатам прямых измерений.

Система уравнений (1) преобразуется к виду, где зависимые переменные выражаются через независимые:

$$y_j = \varphi_j(p_1, p_2, \dots, p_m), \quad j = 1, \dots, h. \quad (2)$$

В случае нелинейных или неявных зависимостей, когда аналитическое решение невозможно, применяется параметризация в форме:

$$y_j = \varphi_j(p_1, p_2, \dots, p_m, y_1, \dots, y_{(j-1)}, y_{(j+1)}, \dots, y_h), \quad j = 1, \dots, h. \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) служат основой для вычисления матрицы чувствительности $S = [\partial y_j / \partial p_i]$, где частные производные оцениваются методом линеаризации в окрестности номинальных значений параметров. Данная матрица позволяет количественно оценить влияние погрешностей прямых измерений Δp_i на точность косвенных оценок

Δy_j , что критично для оптимизации структуры диагностической системы. Формализм соответствует требованиям теории измерений (ГОСТ 8.401-80) и методам анализа динамических систем (ГОСТ Р ИСО 13379-2–2016).

Линеаризация уравнений методом малых отклонений в диагностике судовых систем

Частные производные косвенных величин удобно находить, пользуясь методом малых отклонений. Тогда на базе исходных уравнений вида (1) формируются линейные уравнения, в которых коэффициенты при переменных, называемые коэффициентами влияния, содержат искомые частные производные.

Метод малых отклонений широко применяется для моделирования энергетических установок различных типов: газотурбинных [10, 11], дизельных [12], паротурбинных [13]. Для некоторых видов оборудования получены уравнения в малых отклонениях с численными значениями коэффициентов влияния.

Рассмотрим суть метода малых отклонений. Пусть функциональная зависимость $y = f(p)$ связывает косвенную величину y и измеряемый параметр p . Причём в определённый момент времени $y=b$, $p=a$. Пусть далее требуется определить, насколько изменится косвенная величина y , если измеряемый параметр p получил небольшое приращение Δp к начальному значению. Известно, что связь между малыми приращениями аргумента и функции выражается соотношением:

$$dy = f'(a)dp, \quad (4)$$

где: $f'(a)$ - значение производной функции $y^* = f'(a)$ в точке a .

В методе малых отклонений полагают, что такое соотношение справедливо и для малых конечных приращений Δy и Δp :

$$\Delta y = f'(a)\Delta p. \quad (5)$$

Как бы сложно не отображалась функциональная зависимость между величинами y и p , используя указанное выше соотношение получаем линейные уравнения для малых приращений Δy и Δp . Отметим, что принятое в методе малых отклонений допущение о равенстве дифференциала и конечного приращения не накладывает никаких ограничений на применение метода выбора оптимального способа измерения, так как здесь не имеет значения, какое из уравнений (4) или (5) рассматривается. Важно только то, что в обоих уравнениях в качестве коэффициента выступает значение частной производной в определённой точке.

Пусть косвенная величина y зависит не от одного, а от нескольких измеряемых параметров:

$$y = f(p_1, p_2, p_3). \quad (6)$$

Рассматривая небольшие изменения величин в сравнении с их значениями в исходном режиме, примем, что приращение функции приближённо равно их дифференциалам. В частности, при изменении нескольких переменных считаем, что приращение функции равно её полному дифференциалу, т.е.:

$$\Delta y = k_1 \Delta p_1 + k_2 \Delta p_2 + k_3 \Delta p_3. \quad (7)$$

Здесь коэффициенты влияния равны значениям соответствующих частных производных в исходной точке, т.е. при заданных начальных значениях p_{10}, p_{20}, p_{30} :

$$k_1 = \left(\frac{\partial f}{\partial p_1} \right) \text{ при } p_2 = \text{const}, p_3 = \text{const};$$

$$k_2 = \left(\frac{\partial f}{\partial p_2} \right) \text{ при } p_1 = \text{const}, p_3 = \text{const};$$

$$k_3 = \left(\frac{\partial f}{\partial p_3} \right) \text{ при } p_2 = \text{const}, p_1 = \text{const}.$$

Для получения безразмерных частных производных воспользуемся логарифмическим дифференцированием. Для этого исходные уравнения приведём к виду:

$$y = c f_1(p_1) \cdot f_2(p_2) \cdot f_3(p_3), \quad (8)$$

затем выполним логарифмирование:

$$\ln y = \ln c + \ln f_1(p_1) + \ln f_2(p_2) + \ln f_3(p_3), \quad (9)$$

и дифференцирование:

$$\frac{dy}{y} = 0 + \frac{\partial f_1(p_1)}{\partial p_1} \cdot \frac{dp_1}{f_1(p_1)} + \frac{\partial f_2(p_2)}{\partial p_2} \cdot \frac{dp_2}{f_2(p_2)} + \frac{\partial f_3(p_3)}{\partial p_3} \cdot \frac{dp_3}{f_3(p_3)}. \quad (10)$$

После умножения и деления каждого слагаемого в правой части на величину, по которой ведётся дифференцирование, получим:

$$\frac{dy}{y} = \left(\frac{\partial f_1(p_1)}{\partial p_1} \cdot \frac{p_1}{f_1(p_1)} \right) \cdot \frac{dp_1}{p_1} + \left(\frac{\partial f_2(p_2)}{\partial p_2} \cdot \frac{p_2}{f_2(p_2)} \right) \cdot \frac{dp_2}{p_2} + \left(\frac{\partial f_3(p_3)}{\partial p_3} \cdot \frac{p_3}{f_3(p_3)} \right) \cdot \frac{dp_3}{p_3}. \quad (11)$$

Обозначим выражения в скобках - относительные значения частных производных, называемые коэффициентами влияния:

$$c_1 = \left(\frac{\partial f_1(p_1)}{\partial p_1} \cdot \frac{p_1}{f_1(p_1)} \right); \quad c_2 = \left(\frac{\partial f_2(p_2)}{\partial p_2} \cdot \frac{p_2}{f_2(p_2)} \right);$$

$$c_3 = \left(\frac{\partial f_3(p_3)}{\partial p_3} \cdot \frac{p_3}{f_3(p_3)} \right). \quad (12)$$

Для относительного приращения косвенной величины и измеряемых параметров вводятся обозначения:

$$\delta y = \frac{dy}{y}; \quad \delta p_1 = \frac{dp_1}{p_1}; \quad \delta p_2 = \frac{dp_2}{p_2}; \quad \delta p_3 = \frac{dp_3}{p_3}. \quad (13)$$

Тогда уравнение (11) приобретает вид:

$$\delta y = c_1 \cdot \delta p_1 + c_2 \cdot \delta p_2 + c_3 \cdot \delta p_3. \quad (14)$$

Если косвенная величина зависит от большого количества измеряемых параметров, тогда:

$$\delta y = c_1 \cdot \delta p_1 + c_2 \cdot \delta p_2 + \dots + c_m \cdot \delta p_m. \quad (15)$$

Из уравнения (1), связывающего все меняющиеся в процессе эксплуатации величины, следует, что количество косвенных величин равно h . После решения уравнения (15) для каждой из h косвенных величин частные производные найдены.

В том случае, если уравнение вида (3) не удаётся в явном виде разрешить относительно косвенных величин или для этого требуется слишком сложное решение, уравнения дифференцируются непосредственно:

$$dy_j = \frac{\partial f_j}{\partial p_1} dp_1 + \frac{\partial f_j}{\partial p_2} dp_2 + \dots + \frac{\partial f_j}{\partial p_m} dp_m + \frac{\partial f_j}{\partial y_1} dy_1 + \dots + \frac{\partial f_j}{\partial y_{j-1}} dy_{j-1} + \dots + \frac{\partial f_j}{\partial y_h} dy_h. \quad (16)$$

Полученное выражение (16) делится на исходное выражение (3):

$$\frac{dy}{y} = \left(\frac{\partial f_j}{\partial p_1} \cdot \frac{p_1}{f_j} \right) \cdot \frac{dp_1}{p_1} + \left(\frac{\partial f_j}{\partial p_2} \cdot \frac{p_2}{f_j} \right) \cdot \frac{dp_2}{p_2} + \dots + \left(\frac{\partial f_j}{\partial p_m} \cdot \frac{p_m}{f_j} \right) \times \frac{dp_m}{p_m} + \left(\frac{\partial f_j}{\partial y_1} \cdot \frac{y_1}{f_j} \right) \cdot \frac{dy_1}{y_1} + \dots + \left(\frac{\partial f_j}{\partial y_{j-1}} \cdot \frac{y_{j-1}}{f_j} \right) \cdot \frac{dy_{j-1}}{y_{j-1}} + \dots + \left(\frac{\partial f_j}{\partial y_{j+1}} \cdot \frac{y_{j+1}}{f_j} \right) \cdot \frac{dy_{j+1}}{y_{j+1}} + \dots + \left(\frac{\partial f_j}{\partial y_h} \cdot \frac{y_h}{f_j} \right) \cdot \frac{dy_h}{y_h} \quad (17)$$

и записывается в окончательном виде:

$$b_1 \delta y_1 + b_2 \delta y_2 + \dots + y_j + \dots + \delta_h y_h = a_1 \delta p_1 + a_2 \delta p_2 + \dots + a_m \delta p_m, \quad (18)$$

где коэффициентами $b_1, b_2, \dots, b_h$ и $a_1, a_2, \dots, a_m$ обозначены относительные частные производные, стоящие в скобках при соответствующих относительных приращениях, а $b_j = 1$.

После применения метода малых отклонений ко всем исходным уравнениям (1) получим систему, включающую в себя h уравнений вида (4) и (5):

$$\begin{aligned} b_{11} \delta y_1 + b_{12} \delta y_2 + \dots + b_{1h} \delta y_h &= a_{11} \delta p_1 + a_{12} \delta p_2 + \dots + a_{1m} \delta p_m; \\ b_{21} \delta y_1 + b_{22} \delta y_2 + \dots + b_{2h} \delta y_h &= a_{21} \delta p_1 + a_{22} \delta p_2 + \dots + a_{2m} \delta p_m; \\ &\dots \dots \dots \\ b_{h1} \delta y_1 + b_{h2} \delta y_2 + \dots + b_{hh} \delta y_h &= a_{h1} \delta p_1 + a_{h2} \delta p_2 + \dots + a_{hm} \delta p_m. \end{aligned} \quad (19)$$

Для поиска частных производных необходимо решить систему уравнений относительно косвенных величин, считая параметры прямого измерения известными. Для решения системы уравнений (19) целесообразно её записать в матричной форме:

$$B \delta y = A \delta p, \quad (20)$$

где B и A формируются из коэффициентов системы уравнений (19):

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \dots & b_{1h} \\ b_{21} & b_{22} \dots & b_{2h} \\ \dots & \dots & \dots \\ b_{h1} & b_{h2} \dots & b_{hh} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{h1} & a_{h2} \dots & a_{hm} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Решим систему уравнений (20) обратив матрицу B и умножив обращённую матрицу на матрицу A :

$$C = B^{-1} \cdot A. \quad (22)$$

Эта операция выполняется по программам, входящим в стандартное математическое обеспечение ПЭВМ. В развёрнутом виде матрица C имеет вид:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \dots & C_{1m} \\ C_{21} & C_{22} \dots & C_{2m} \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{h1} & C_{h2} \dots & C_{hm} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Матрица содержит в качестве элементов C_{ji} ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, h$) искомые частные производные, приведённые к безразмерному виду. В частности, C_{ji} – это частная производная косвенной величины y_j по параметру прямого измерения p_i :

$$C_{ji} = \frac{\partial y_j}{\partial p_i} \cdot \frac{p_i}{y_j}. \quad (24)$$

Система уравнений (19), полученная методом малых отклонений, удобна для анализа различных групп измеряемых параметров и окончательного выбора оптимальной группы параметров из L возможных. При этом для нахождения частных производных косвенных величин по всем измеряемым параметрам каждой новой группы необходимо произвести лишь формальную операцию. Она заключается в переносе коэффициентов из матрицы A в матрицу B , а из матрицы B в матрицу A .

Например, имеется возможность измерить j – тую косвенную величину y_j . Внесём её в группу измеряемых параметров. В свою очередь из этой группы можно исключить один из параметров, измеряемых ранее и перевести его в группу косвенных величин. Пусть это будет i – й параметр p_i . Таким образом получена новая группа измеряемых параметров. Для составления нового матричного уравнения вида (20) необходимо поменять местами j – й столбец матрицы B и i – й столбец матрицы A . В результате решения матричного уравнения вида (20) получим новое решение вида (22). Матрица C в этом случае будет состоять из искоемых частных производных для новой группы измеряемых параметров. Однако изложенная выше формальная операция возможна только для линейных уравнений (1) с переменными коэффициентами.

Синтез уравнений функциональных связей и оптимизация стоимости измерительных процедур в диагностике судовых систем

Уравнения связи отражают условия, для которых определяется оптимальная группа измеряемых параметров и оптимальная точность их измерения. При проектировании системы технической диагностики в качестве критериев оптимизации принимают минимальную стоимость процесса измерения, максимальное значение показателя, характеризующего эффективность диагностики и максимальную точность измерения. Указанные критерии отражаются линейной функцией затрат и квадратичной функцией потерь. Рассмотрим способы отыскания указанных функций.

Функция затрат устанавливает связь между стоимостью средств диагностического контроля и основной характеристикой класса точности.

В общем виде функция затрат для каждого измеряемого параметра определяется из (1, 2) [14]. Суммарная функция затрат определяется выражением (3). Для составления уравнения связи, отражающего функции затрат, необходимо найти коэффициенты C_i , характеризующие затраты на создание средств диагностики, и задаться суммарной стоимостью диагностики исследуемого оборудования C . Среднее значение коэффициента C_i можно найти известным в статистике методом наименьших квадратов [13]. Для этого прологарифмируем уравнение:

$$C_n = \frac{c}{\sigma}. \quad (25)$$

Получим:

$$lg c_n = lgc - lg\sigma, \quad (26)$$

где: σ – средняя квадратическая погрешность средства измерения при его градуировке; C – коэффициент, отражающий затраты на создание информационно-измерительной системы (ИИС).

Найдём уравнение линейной регрессии для уравнения (25). Здесь $lg\sigma$ является аргументом, а lgc – свободным членом уравнения. Для линейного уравнения (25) свободный постоянный коэффициент находится по формуле:

$$lg c = \frac{\sum_{k=1}^n lg(c_n)_k - \sum_{k=1}^n lg\sigma_k}{n}, \quad (27)$$

где: $(c_n)_k, \sigma_k$ – стоимость и класс точности источника информации для параметра p_k , по которым ведётся осреднение ($k = 1, 2, \dots, n$). Значения стоимостей источников информации можно найти в соответствующих справочниках.

В первом приближении коэффициент C равен стоимости источника информации, имеющего класс точности 1,0. После нахождения коэффициента c_n для каждого измеряемого параметра p_k получим искомое уравнение связи:

$$\psi(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n) = \sum_{i=1}^n \frac{c_n}{\sigma_k} - C = 0. \quad (28)$$

Из [14] следует, что определение оптимального способа измерения является довольно сложным при ограничениях на стоимость в виде нелинейного уравнения связи (28), и, такое решение, возможно лишь численными методами. Решение задачи можно значительно упростить, если воспользоваться линейной функцией затрат. Это допустимо, если диапазон изменения аргументов функции затрат небольшой. Для судового экологического оборудования этот диапазон лежит в пределах (1-4) %. Поэтому с достаточной для практики точностью в качестве функции затрат можно использовать линейную функцию. Для этого разложим функцию (25) в ряд Тейлора в точке, характерной для класса точности 2,5, лежащего в середине указанного выше диапазона:

$$C_n = (c_n^{2,5} - 0,5c_i) - (0,2c_i)\sigma_{i1}, \quad (29)$$

где $c_n^{2,5}$ – стоимость измерителя информации с классом точности 2,5. Значение коэффициента c_i находится по формуле (27).

Суммируя выражение (29) по всей группе параметров, получим линейное уравнение связи, отражающее функцию затрат:

$$\psi(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n) = c - 0,2 \sum_{i=1}^n c_i \sigma_i = 0, \quad (30)$$

где $c = \sum_{i=1}^n (c_n^{2,5})_i + 0,5 \sum_{i=1}^n c_i$.

Таким образом для построения линейного уравнения связи, учитывающего функцию затрат, необходимы данные по стоимости источников информации с классом точности 2,5 и по коэффициентам, отражающим затраты на создание источника информации с классом точности 1,0.

Погрешность измерения

Линейная функция потерь показывает влияние погрешности измерения на изменение величины обобщённого показателя исследуемого экологического оборудования, характеризующего

эффект его диагностирования. В качестве обобщённого показателя целесообразно брать выходную характеристику оборудования, свидетельствующую о полезном эффекте его использования. Такими характеристиками могут быть косвенные величины, которые непосредственно не измеряются. При правильном выборе исходных уравнений (1) одно из них должно отражать связь между выбранным показателем и измеряемыми параметрами. Это уравнение лежит в основе линейной функции потерь. Влияние погрешности измерения на изменение величины обобщённого показателя полностью характеризуется коэффициентами влияния в соответствующем уравнении в малых отклонениях системы (19). Для формирования уравнения связи вида (30) в качестве коэффициента a_i следует брать элементы соответствующей строки матрицы C (23), а в качестве допустимой потери диагностирования i – е допустимые отклонения показателя полезного эффекта.

Квадратичная функция потерь используется в том случае, когда необходимо измерить некоторую косвенную величину с определённой погрешностью. Прежде всего такая необходимость возникает в задачах диагностирования технического состояния оборудования. Соответствие диагностического параметра, характеризующего техническое состояние объекта, нормированным пределам, установленным в соответствии с требованиями ISO 13379-1:2020 и ГОСТ 27.002-2015, служит критерием, классифицирующим оборудование, как находящееся в работоспособном состоянии. Превышение данных границ указывает на достижение предельного состояния, при котором дальнейшая эксплуатация объекта становится недопустимой из-за риска возникновения отказа или нарушения экологической безопасности. Количественная оценка отклонений осуществляется через сравнение с эталонными значениями, определёнными в процессе сертификационных испытаний и регламентированных технической документацией производителя.

Погрешность измерения косвенной величины определяется известным в метрологии выражением [11]:

$$S_y^2 = a_1\sigma_1^2 + a_2\sigma_2^2 + \dots + a_n\sigma_n^2, \quad (31)$$

где $a_i = \left(\frac{\partial y}{\partial p_i}\right)^2$ – квадрат частной производной косвенной величины $y = \varphi(p_1, p_2, \dots, p_n)$ по параметру p_i при $p_i = a_i (i = 1, 2, \dots, n)$.

Для построения уравнения связи (30) следует, как в предыдущем случае, в качестве коэффициента a_i взять квадрат i – о элемента строки матрицы C (23), а в качестве допустимой потери управления – S – квадрат допустимой погрешности измерения характеристики технического состояния, характеризующего эффект его диагностирования.

Заключение

Разработан алгоритм оптимизации измерительных процедур для систем технической диагностики судового экологического оборудования, обеспечивающий выбор рационального набора диагностических параметров и обоснование их

метрологических характеристик. Алгоритм основан на преобразовании исходных функциональных зависимостей, связывающих эксплуатационные параметры оборудования, с целью выражения косвенных характеристик через параметры прямых измерений. Это позволяет определить коэффициенты влияния, количественно отражающие вклад погрешностей измерений в общую неопределённость оценки технического состояния.

Корректность применения метода малых отклонений для линеаризации нелинейных зависимостей подтверждена аналитически: допущение о равенстве дифференциала и конечного приращения сохраняет точность в окрестности номинальных значений параметров, что соответствует требованиям метрологических стандартов. Решение системы линеаризованных уравнений реализовано в матричной форме,

обеспечивающей вычислительную устойчивость при наличии коррелированных погрешностей.

Синтезированы целевые функции оптимизации, отражающие компромисс между тремя критериями: минимизацией стоимости измерительных процедур, максимизацией эффективности диагностики (вероятность обнаружения отказов) и достижением заданной точности контроля. Эти критерии формализованы через функции потерь, учитывающие экономические издержки и экологические риски, связанные с недоверием к диагнозу. Установлена количественная взаимосвязь между стоимостью диагностического оборудования и классом точности измерений. Показано, что изменение обобщённого показателя состояния оборудования полностью определяется коэффициентами влияния, полученными из системы уравнений в малых отклонениях.

Литература

1. Поляков А.С., Скороходов Д.А. Принципы обработки информации по оценке надёжности оборудования транспорта // Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы. 2013. № 3. С. 65–69.
2. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Информационное обеспечение безопасности объектов инфраструктуры Арктического региона и Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4-1(62). С. 179–188.
3. Копытов Ю.В., Скороходов Д.А. Определение ресурса насосов в различных режимах работы // Морской вестник. 2015. № 1(53). С. 52–54.
4. Копытов Ю.В., Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Определение ресурса гидромашин в зависимости от условий эксплуатации и расчет эквивалентного времени работы // Морской вестник. 2017. № 1(61). С. 55–57.
5. Соболев В.И. Информационно-статистическая теория измерений. М.: Машиностроение, 1983. 256 с.
6. Гаврилова А.Н., Скороходов Д.А. Расчётные исследования системы очистки и охлаждения отработавших газов теплового двигателя // Морской вестник. 2015. № 3(55). С. 47–48.
7. Скороходов Д.А., Стариченков А.Л., Каминский В.Ю. Комплексная оценка технического состояния магистрального газопровода. Бельцы: LAP LAMBERT, 2017. 65 с.
8. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Козьмовский Д.В. Комплексная оценка безопасности линейной части магистрального газопровода // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2017: Материалы Международной научно-практической конференции / Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН. СПб., 2017. С. 322–327.
9. Александров М.А., Богданов А.Г., Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Надёжность изделий судового машиностроения // Морской вестник. 2017. № 4(64). С. 45–46.
10. Черкев А.Я. Инженерные расчёты газотурбинных двигателей методом малых отклонений. М.: Машиностроение, 1965. 264 с.
11. Ахметзянов А.М., Дубровский Н.Г., Тунаков А.П. Диагностика состояния ВРД по термодинамическим параметрам. М.: Машиностроение, 1983. 206 с.
12. Васильев-Южин Р.М. Работа судового дизеля в неспецификационных условиях. Л.: Судостроение, 1967. 212 с.
13. Марчук Е.С., Швед А.П. Анализ влияния эксплуатационных параметров на экономичность судовых турбин // Труды Николаевского кораблестроительного института. Теплотехника. 1975. Вып. 97. С. 83–91.
14. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Оптимизация системных математических моделей экологического взаимодействия морского транспорта и окружающей среды // Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 1-1(67). С. 196–204.

References

1. Poliakov A.S., Skorokhodov D.A. Printsipy obrabotki informatsii po otsenke nadezhnosti oborudovaniia transporta [Principles of information processing for assessing the reliability of transport equipment] // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta gosudarstvennoi protivopozharnoi sluzhby. 2013. No. 3. P. 65–69.
2. Kaminsky V.Yu., Skorokhodov D.A. Informatsionnoe obespechenie bezopasnosti ob"ektov infrastruktury Arkticheskogo regiona i Severnogo morskogo puti [Information support for the security of infrastructure facilities in the Arctic region and the Northern Sea Route] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2023. No. 4-1(62). P. 179–188.
3. Kopytov Yu.V., Skorokhodov D.A. Opredelenie resursa nasosov v razlichnykh rezhimakh raboty [Determining the resource of pumps in various operating modes] // Morskoi vestnik. 2015. No. 1(53). P. 52–54.
4. Kopytov Yu.V., Kaminsky V.Yu., Skorokhodov D.A. Opredelenie resursa gidromashin v zavisimosti ot uslovii ekspluatatsii i raschet ekvivalentnogo vremeni raboty [Determining the resource of hydraulic machines depending on operating conditions and calculation of equivalent operating time] // Morskoi vestnik. 2017. No. 1(61). P. 55–57.

5. Sobolev V.I. Informatsionno-statisticheskaya teoriya izmerenii [Information-statistical theory of measurements]. M.: Mashinostroyeniye, 1983. 256 p.
6. Gavrilova A.N., Skorokhodov D.A. Raschetnye issledovaniya sistemy ochistki i okhlazhdeniya otrabotavshikh gazov teplovogo dvigatelya [Calculative studies of the system for cleaning and cooling exhaust gases of a heat engine] // Morskoi vestnik. 2015. No. 3(55). P. 47-48.
7. Skorokhodov D.A., Starichenkov A.L., Kaminsky V.Yu. Kompleksnaya otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya magistral'nogo gazoprovoda [Comprehensive assessment of the technical condition of the main gas pipeline]. Bel'tsy: LAP LAMBERT, 2017. 65 p.
8. Kaminsky V.Yu., Skorokhodov D.A., Koz'movskii D.V. Kompleksnaya otsenka bezopasnosti lineinoi chasti magistral'nogo gazoprovoda [Comprehensive assessment of the safety of the linear part of the main gas pipeline] // Transport Rossii: problemy i perspektivy - 2017: Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii / Institut problem transporta im. N.S. Solomenko RAN. SPb., 2017. P. 322-327.
9. Aleksandrov M.A., Bogdanov A.G., Kaminsky V.Yu., Skorokhodov D.A. Nadezhnost' izdelii sudovogo mashinostroyeniya [Reliability of marine engineering products] // Morskoi vestnik. 2017. No. 4(64). P. 45-46.
10. Cherkev A.Ya. Inzhenernye raschety gazoturbinnnykh dvigatelei metodom mal'kikh otklonenii [Engineering calculations of gas turbine engines by the method of small deviations]. M.: Mashinostroyeniye, 1965. 264 p.
11. Akhmetzianov A.M., Dubrovskii N.G., Tunakov A.P. Diagnostika sostoyaniya VRD po termodinamicheskim parametram [Diagnostics of GTE condition by thermodynamic parameters]. M.: Mashinostroyeniye, 1983. 206 p.
12. Vasil'ev-luzhin R.M. Rabota sudovogo dizelia v nespetsifikatsionnykh usloviyakh [Operation of a marine diesel engine in non-specification conditions]. L.: Sudostroyeniye, 1967. 212 p.
13. Marchuk E.S., Shved A.P. Analiz vliyaniya ekspluatatsionnykh parametrov na ekonomichnost' sudovykh turbin [Analysis of the influence of operational parameters on the efficiency of marine turbines] // Trudy Nikolaevskogo korablestroitel'nogo instituta. Teploenergetika. 1975. Iss. 97. P. 83-91.
14. Kaminsky V.Yu., Skorokhodov D.A. Optimizatsiya sistemnykh matematicheskikh modelei ekologicheskogo vzaimodeystviya morskogo transporta i okruzhaiushchei sredy [Optimization of system mathematical models of ecological interaction of sea transport and environment] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2025. No. 1-1(67). P. 196-204.

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

Скорыходов Дмитрий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; e-mail: skorohodda@mail.ru

Dmitriy A. Skorokhodov, professor, Dr. Sci. (Eng), Chief researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: skorohodda@mail.ru

Каминский Валерий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Valery Yu. Kaminsky, assistant professor, PhD (Eng), Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 26.01.2026.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 02.02.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 04.02.2026.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Научная статья

УДК 658.512.2:658.512.3: (045)

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.029>

О совершенствовании методов долгосрочного и среднесрочного планирования постройки заказов

Куперштейн В.И.¹ vkuper@mail.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье рассмотрен подход к совершенствованию методов долгосрочного и среднесрочного планирования постройки судостроительных заказов на основе использования метода системной динамики. С учётом возможностей такого метода разработана комплексная модель работы производств единичного типа, характерного для судостроения. Такая модель включает собственно математическую модель работы производственной ячейки, модель технологических процессов на основе взаимосвязей таких ячеек, укрупнённую модель комплексного обеспечения производства материалами, документацией и изделиями собственного изготовления. Предложена схема алгоритма решения задачи на основе конечно-разностного подхода для условий выталкивающего производства. Рассмотрены основные возможности программного обеспечения, разработанного для решения такой задачи. Предложены типовые сценарии использования такого программного обеспечения с учётом характерных для верфи ролей заинтересованных специалистов. Показаны преимущества этого метода по сравнению с методами объёмно-календарного планирования, которые широко применяются для решения таких задач на практике при использовании специального программного обеспечения.

Ключевые слова: Моделирование производства, моделирование постройки заказов, производство единичного типа, метод системной динамики, планирование производства, укрупнённое планирование, долгосрочное планирование, производственная ячейка, узкие места.

Благодарности: автор выражает благодарность д.т.н. А.Е. Богданову за поддержку, ценную критику и интересные идеи.

Финансирование: Инициативное исследование.

Для цитирования: Куперштейн В.И. О совершенствовании методов долгосрочного и среднесрочного планирования постройки заказов Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 283—291. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.029.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.029>

On improvement of methods of long-term and medium-term planning of ships construction

Vladimir I. Kupershteyn¹ vkuper@mail.ru

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The article concerned on improvement of preliminary (long- and middle-term) planning methods on base of systems dynamics methods. Complex model of project-oriented production, typical for shipbuilding industry, was developed taking into account possibilities of this methods. This model includes same mathematical model of production cell activity, model of technological processes on base of cell's interrelation, simplified model of complex supply of production with materials, documents and own-manufactured products. The scheme of the task decision on base of finite-differences approach developed for push-production. Basic possibilities of program, developed for this task decision, are surveyed. Typical scenarios of using the program proposed on base of specific for shipyards engaged specialists roles. The advantages of proposed approach in comparison with traditional, wide using for concerned task in practice, volume-calendar methods presented.

Key words: Production modelling, production simulation, ships construction modelling, project-type production, system dynamics method, production planning, long-term planning, preliminary planning, production cell, bottleneck.

Acknowledgments: the author would like to thank Dr. Sci. (Eng) Alexander E. Bogdanov for your support, valuable criticism and interesting ideas.

Financial Support: Action research.

For citation: Vladimir I. Kupershteyn On improvement of methods of long-term and medium-term planning of ships construction Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 283—291. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.029.

Введение

Современный взгляд на оперативное управление постройкой судов основывается на использовании цифровых моделей самих судов, производственных мощностей и применяемых технологических процессов. Такой подход позволяет организовать управление постройкой заказов и производством с очень высокой степенью детальности и объективности, причём такие методы должны предусматривать ограничения, которые накладываются стапельным расписанием. Стапельное расписание в свою очередь отражает ограничения сроков, предусмотренные контрактами.

Но условия контрактов (включая ключевые сроки постройки заказов) являются результатом переговоров, в ходе которых руководству верфи необходимо иметь данные, позволяющие обоснованно формировать свою позицию относительно допустимых временных рамок новых контрактов с учётом загрузки мощностей верфи другими заказами на весь период постройки нового заказа.

Для этой цели могут использоваться методы сетевого планирования и управления (далее по тексту – СПУ), но на многих верфях отсутствуют специалисты, имеющие опыт такой работы. В отсутствии таких специалистов высокая степень свободы в определении показателей работ сетевого графика и их связей могут создать немало проблем. Рассматривая каждую работу и даже локальные комплексы работ, приходится каждый раз принимать решение об оценке их показателей и об их связях в отрыве от той общей производственной ситуации, которая сложится в момент выполнения таких работ. А такая ситуация может сильно влиять на оценки показателей очень многих работ. Для того, чтобы при этом сетевой график был объективным, необходимо использовать большое количество дополнительных сведений, во многом вытекающих из основных показателей укрупнённого представления процесса постройки судна.

Поэтому в отечественной промышленности постепенно сложились и уже давно широко применяются на практике для долгосрочного и даже для среднесрочного планирования более простые методы объёмно-календарного планирования. Их сущность заключается в том, что с помощью некоторых эвристических методов определяется распределение объёмов работ по календарным интервалам и цехам для всех заказов производственной программы предприятия.

Если для строящихся заказов программы предприятия такое распределение на глубину нескольких месяцев можно сформировать обоснованно, то для новых заказов это становится нетривиальной задачей. Дефицит плановиков высокого класса и высокий уровень неопределённости, характерный для таких задач, на практике приводит к тому, что на этой стадии для новых заказов объёмно-календарные показатели определяются с неясной долей погрешности, что может сделать такие планы и оценку ключевых сроков постройки новых заказов недостаточно обоснованной.

Математическая модель работы ячейки

В ряде источников в разные годы делались попытки предложить математические модели процессов постройки судов или других изделий, изготавливаемых в условиях единичного производства (см., например, [1], [2], [3], [4]). Но они не позволили добиться широкого использования более эффективных методов на практике. В последние годы появляются работы по использованию для целей планирования судостроительного производства методов имитационного моделирования (прежде всего на основе методов агентного или дискретно-событийного моделирования). Примером такой работы может служить, например, статья [5]. Такие подходы, основанные на использовании для каждого заказа наборов обладающих определёнными свойствами дискретных компонентов, могут быть полезными для оперативного планирования, но для долгосрочного планирования они оказываются неоправданно громоздкими.

В связи с этим в данной статье сделана попытка использовать для планирования хорошо освоенную. отечественными верфями на практике объёмно-календарную модель строительства судов, но в отличие от сложившейся практики предложено формировать такую модель средствами системной динамики. Метод системной динамики разработан в 50-х годах прошлого века Джеймсом Форрестером из МТИ [6]. Количество литературы по этому вопросу достаточно велико. Анализ показал перспективность использования такого метода для целей планирования и организационно-технологического анализа производств [7].

В соответствии с этой моделью производство рассматривается как совокупность производственных ячеек, за каждой из которых закреплён производственный персонал и средства технологического оснащения. Для каждой такой производственной единицы (ячейки) в соответствии с методом системной динамики можно связать количественные показатели входа и выхода с помощью линейного дифференциального уравнения первого порядка:

$$\dot{y}(t) = b \cdot (f(t) - y(t)), \text{ где} \quad (1)$$

$y(t)$ - функция, численно равная интенсивности выхода ячейки в момент времени t ;

b - постоянный коэффициент, который отражает приращение ценности, формируемое в данной ячейке;

$f(t)$ - функция, описывающая интенсивность входа ячейки в момент времени t .

Для такой модели вход ячейки $f(t)$ можно интерпретировать как оценку интенсивности запуска, а выход ячейки $y(t)$ – как оценку интенсивности выпуска.

Использование такой модели работы производственной ячейки позволяет вычислять её реакцию на разные виды запуска. На рис. 1 показан пример отклика ячейки на импульсный вход в момент времени $t=0$ и на вход постоянной интенсивности, действующий в течение определённого периода времени T . Такая модель позволяет количественно оценивать показатели выпуска в зависимости от объёма входа ячейки производства.

Но модель одной ячейки производства ещё не позволяет моделировать сложные процессы постройки судов.

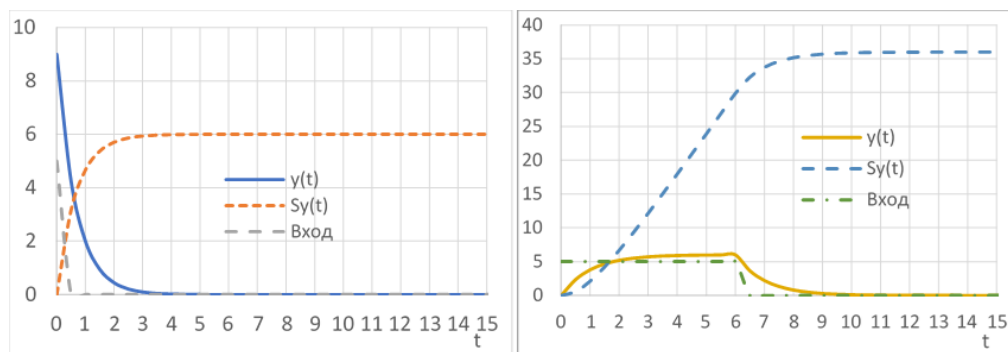


Рис. 1. Примеры отклика модели на импульс входа и на вход постоянной интенсивности

Для этого надо научиться формировать:

состав ячеек производства конкретной верфи с учётом её организации и специализации цезов и участков;

детализированные модели конкретных производственных ячеек с тем, чтобы можно было учитывать их специфику;

состав внешних ресурсов (РКД и материалов), необходимых каждой из ячеек для выполнения характерных для неё работ;

модели технологических цепочек, сложившихся на верфи как связи между ячейками производства, складывающиеся на основе применяемых конкретной верфью типовых технологических процессов;

параметры организационно-технологических решений, определяемых на основании принципиальной технологии постройки каждого из заказов;

модели потоки внешних ресурсов, без которых производство не может работать (прежде всего это РКД, материалы и изделия собственного изготовления);

математическую модель работы ячейки и системы взаимосвязанных ячеек производства.

Состав ячеек производства определяется составом участков и ключевых рабочих мест конкретного производства. При этом виды работ, выполняющихся непосредственно на заказах или в

их блоках, также могут рассматриваться самостоятельные ячейки.

При разработке математической модели работы ячейки следует учитывать, что общее решение уравнения (1) ищется в виде

$$y(t) = A \cdot e^{-at}, \text{ где} \quad (2)$$

В такой формуле есть две константы. Одна из констант может быть определена за счёт использования краевых условий. Но для определения второй константы необходимо учитывать дополнительные параметры, учитывающие специфические особенности конкретной производственной ячейки. В качестве таких параметров предложено использовать:

характерное время выполнения среднего производственного задания (секции, комплекта деталей, помещения и т.д.) в основном – без учёта периода сдачи;

характерное время сдачи среднего производственного задания;

долю работ по сдаче среднего задания.

Это позволило искать приближённое решения уравнения (1) в несколько ином виде (см. рис. 2), который позволяет учитывать специфику соответствующей ячейки. Достоинство такого решения в том, что оно описывает выполнение заданий в конечные сроки, тогда как решение (2) достигает максимума в течение бесконечного времени.

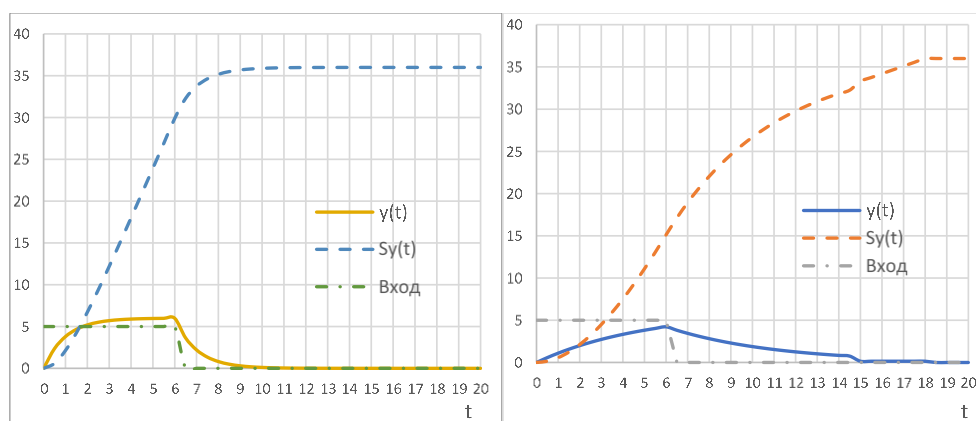


Рис. 2. Пример исходной и уточнённой моделей отклика модели производственной ячейки на вход постоянной интенсивности

В дополнение к этому описание ячейки может включать и другие показатели, например:

- объём работ, который должен быть выполнен ячейкой по конкретному заказу в объёме конкретной производственной программы;
- ограничения интенсивности работ, которые могут определяться нормативным фондом рабочего времени, количеством рабочих мест или другими показателями (например, ограниченным может быть количество станков для сборки секций в сборочно-сварочном цехе, максимальное количество устанавливаемых ежедневно секций при формировании корпуса на стапеле и т.д.);
- стоимость одного часа.

Модель обеспечения работы ячейки внешними ресурсами

Выпуск ячейки, как следует из выбранной модели, определяется запуском – то есть поступившими на её вход ресурсами. В общем случае к таким ресурсам можно отнести:

- материалы и комплектующие изделия (далее по тексту – материалы);
- рабочую конструкторскую документацию (далее по тексту – РКД);
- производственно-технологическую документацию;
- изделия машиностроения собственного изготовления;
- полуфабрикаты, являющиеся выпуском предшествующих по технологическому потоку ячеек.

Но необходимо учитывать, что производственно-технологическая документация и изделия машиностроения выпускаются подразделениями судостроительной верфи и ничто не мешает рассматривать подразделения, выполняющие соответствующие работы как неотъемлемую часть производства наравне с производственными ячейками, то есть включив в модель предприятия соответствующие ячейки. Такое решение позволяет использовать производственно-технологическую документацию и изделия машиностроения наравне с полуфабрикатами, являющиеся выпуском предшествующих по технологическому потоку ячеек.

При этом в качестве внешних ресурсов, поступающих со стороны, остаются РКД и материалы. Графики их поставки на практике являются важной информацией для планирования производства и его подготовки. Для того, чтобы обоснованно связать данные о поставках и РКД с работой ячеек, предлагается в отличие от сложившейся практики группировать РКД и материалы на основе потребности в них. Это позволит привязать поставки к обеспечиваемым видам работ.

На сегодняшний день такая группировка может представляться непривычной, но в условиях применения на любой верфи автоматизированной системы класса ERP сформировать необходимую статистику вполне можно.

Ячейки производства существуют не сами по себе – они связаны друг с другом так, что выпуск одной ячейки становится запуском одной или нескольких других ячеек. При этом, рассматривая пару взаимосвязанных ячеек i и j , в общем случае можно считать, что в любой момент времени максимально

возможный выпуск последующей ячейки j по отношению к его максимальному объёму V_j не может быть больше, чем выпуск предшествующей ячейки i по отношению к его максимальному объёму V_i .

Для каждой i -ой ячейки производства на основе анализа сложившихся на предприятии технологических процессов можно задать одну или несколько связей с последующими по технологическому потоку ячейками, каждая из которых может определяться следующим набором данных:

$x_{i,j}$ - коэффициент распределения объёма выпуска ячейки i между последующими ячейками (которые обозначены символом j). Для этих показателей должно выполняться условие $\sum_j x_{i,j} = 1$;

$d_{i,j}$ - показатель, определяющий минимальную относительную величину задела, который должен быть накоплен по связи i,j для того, чтобы работы ячейки j могли бы быть начаты. Этот показатель может быть задан в диапазоне $\{0,1\}$. При этом ограничение максимально возможного продвижения работ ячейки j в зависимости значений показателя $d_{i,j}$ и относительного объёма выпуска ячейки i может выглядеть так, как это показано на рис.3.

Описанная выше схема определяет достаточно гибкую модель связи двух ячеек.

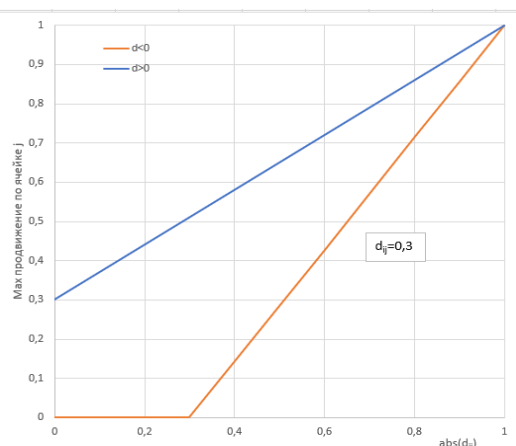


Рис. 3. Примеры форм влияния выпуска предшествующей ячейки на выпуск последующей ячейки с учётом величины относительного задела

С её помощью объём запуска, поступающего в момент времени t на вход ячейки j , может быть вычислен по формуле

$$z_j(t) = \sum_i y_{ij}(t) \cdot d_{i,j}, \text{ где} \quad (3)$$

$z_{ij}(t)$ - объём запуска в ячейку j , сформированный в момент времени t всеми предшествующими ячейками;

$y_{ij}(t)$ - объём выпуска ячейки i , непосредственно предшествующей в технологическом потоке ячейке j .

Одновременно предложенная модель учитывает, что запуск любой ячейки, формирующийся из нескольких источников, должен быть комплектным. Для учёта этого фактора предложено по каждой из связей ячейки j с предшествующими ячейками (условно им присвоен индекс i) вычислять уровень

обеспеченности как отношение текущего объёма выпуска предшествующей ячейки j к полному объёму выпуска этой же ячейки

$$w_i(t) = \frac{y_i(t)}{V_i}, \text{ где} \quad (4)$$

Требование комплектности запуска ячейки j предложено сформулировать так – в любой момент времени расчётное значение объёма комплектного запуска z^k для ячейки следует вычислять по минимальному уровню обеспеченности из всех видов обеспечения по следующей формуле:

$$z_j(t) = w_i^{\min}(t) \sum_i y_{ij}(t) \cdot d_{i,j}, \text{ где} \quad (5)$$

$w_i^{\min}(t)$ – минимальное в момент времени t значение $w_i(t)$ (см. формулу (4)).

Такому подходу соответствует пример диаграммы, показанной на рис. 4.

В дополнение к описанным подходам предложено дополнительно учитывать некоторые параметры организационно-технологической схемы постройки заказов – например, оценки объёмов работ по насыщению секций и блоков разными видами работ. Это позволяет учитывать при моделировании (планировании) ограничения распределения объёмов работ основных видов по циклу постройки судна.

В целом предложенная модель соответствует выталкивающей модели производства.

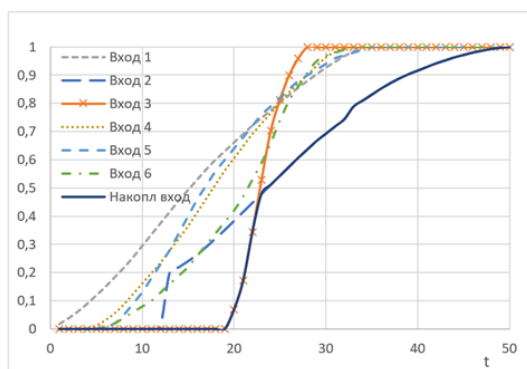


Рис. 4. Пример учёта влияния на расчётный запуск (вход) ячейки выпуска предшествующих ячеек

О решении задачи

Был разработан алгоритм решения рассмотренной задачи, реализованный на основе численного метода. Он позволяет одновременно моделировать нарастание показателей ценности (основных элементов прямых затрат на постройку судна) и затрат труда.

Разработанный алгоритм позволяет использовать в качестве начальных условий

утверждённые и выполняющиеся планы. При этом такие начальные условия для уже строящихся заказов могут формироваться на основе любой технико-экономической модели, например, сетевого графика или объёмно-календарной модели.

Опыт показал, что при этом достаточно выбрать в качестве шага по времени одну неделю. Это обеспечивает приемлемую точность определения плановых показателей и одновременно – достаточно высокую оперативность расчётов.

Выполненные исследования позволили определить практические подходы к решению перечисленных задач и разработать на этой основе программное обеспечение, необходимое для оценки работоспособности и эффективности предложенного метода долгосрочного планирования производства и анализа его узких мест (на первом шаге – в качестве действующего макета программного средства). При этом практически все типы выходных данных могут представляться пользователям как в виде таблиц, так и в виде диаграмм.

Разработанная модель и программное обеспечение ориентированы на систему выталкивающего производства. Но существует перспектива развития рассмотренного метода моделирования постройки судов применительно к условиям вытягивающего производства. Обоснование такой возможности рассмотрено в источнике [8].

В результате расчётов формируется информация (в большинстве случаев в разрезе цехов, видов производств или видов работ) о:

- стапельном расписании заказов, включённых в расчётную программу (см. рис. 5);
- нарастании готовности заказов в течение расчётного интервала (см. рис. 6);
- данных о загрузке производственных мощностей (см. рис. 7);
- укрупнённом графике работ (см. рис. 7);
- уровне заделов (см. рис. 9);
- узких местах, задерживающих продвижение работ (см. рис. 10).

Все приведенные выше примеры диаграмм получены на основании данных отладочного контрольного примера.

Состав и содержание работ по созданию и анализу модели производства могут вытекать из типовых ролей специалистов верфи и ЦКБ. Примерная характеристика распределения ответственности за разные группы данных и заинтересованности в определённых результатах моделирования между основными ролями специалистов верфи приведена в табл. 1.

Таблица 1.

Характеристика ролевой модели рассматриваемой задачи

Роль	Ответственность за исходные данные	Заинтересованность в результатах
Технолог	Состав ячеек производства (видов работ). Состав цехов. Состав видов производств. Связи между ячейками производства. Трудоёмкость постройки судна и её распределения по ячейкам производства.	Минимальные сроки постройки заказов с учётом или без учёта ограничений по поставкам материалов и РКД. Загрузка цехов и производственных ячеек. Состав узких мест производства. Оценка эффективности мероприятий по совершенствованию производства и устранению узких мест.

Роль	Ответственность за исходные данные	Заинтересованность в результатах
	Параметры организационно-технологической схемы постройки заказа.	
Строитель	Плановый срок начала работ по строительству заказа. Проекты графиков поставки материалов и РКД. Временные рамки моделирования.	Минимальные сроки постройки заказов с учётом по поставкам материалов и РКД. Состав сдерживающих производство факторов. Распределение объёмов работ ячеек и цехов по календарным интервалам. Сроки выполнения основных видов работ.
Плановик	Ограничения по производственной мощности ячеек. Временные рамки моделирования.	Распределение объёмов работ ячеек и цехов по календарным интервалам. Сроки выполнения основных видов работ. Загрузка цехов и производственных ячеек. Состав узких мест производства.
Главный конструктор проекта	График поставки РКД	Предложения по пересмотру графика поставки РКД, вытекающие из анализа узких мест.
Специалист по закупкам	Предлагаемые сроки поставок материалов	Предложения по пересмотру графика поставок материалов, вытекающие из анализа узких мест.
Экономист	Стоимость часа по цехам. Стоимость материалов. Стоимость РКД.	Проект бюджета движения денежных средств

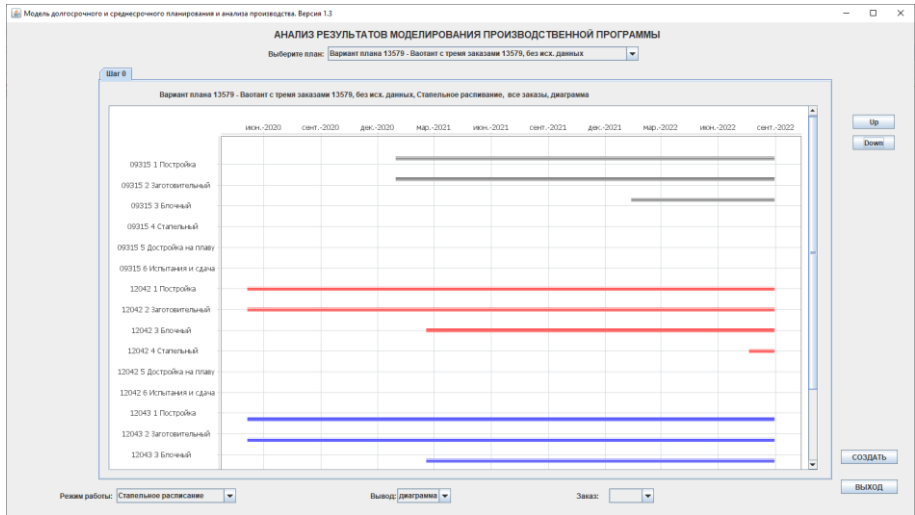


Рис. 5. Пример экранной формы с данными стапельного расписания

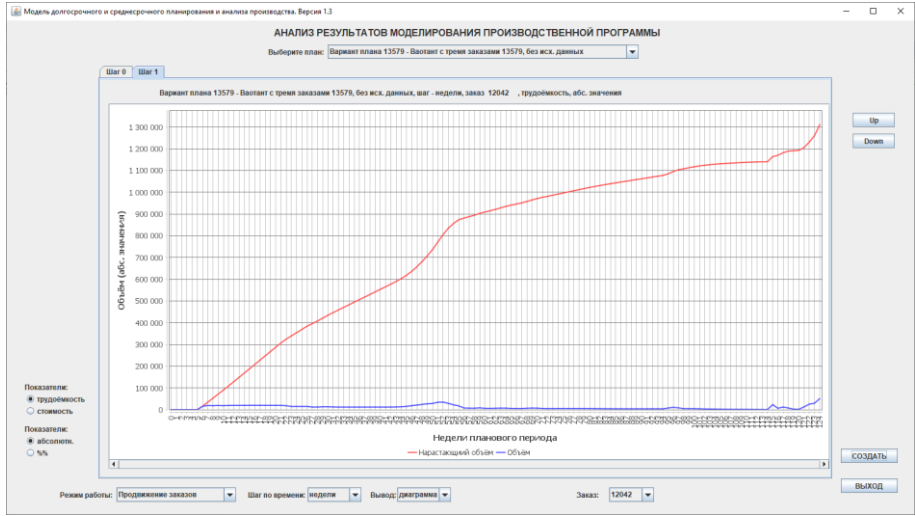


Рис. 6. Пример экранной формы с данными о нарастании готовности заказа

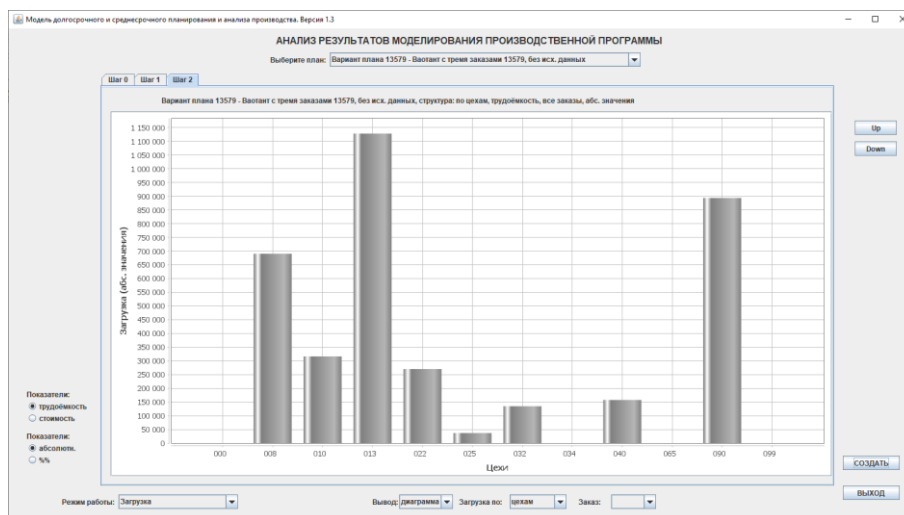


Рис. 7. Пример экранной формы диаграммой загрузки цехов



Рис. 8. Пример экранной формы с укрупнённым графиком работ

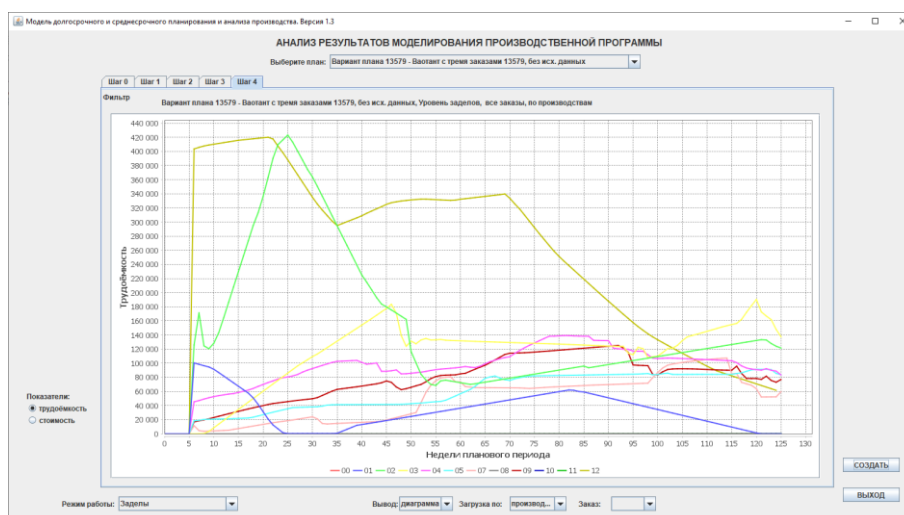


Рис. 9. Пример экранной формы с диаграммой уровня заделов по видам производства

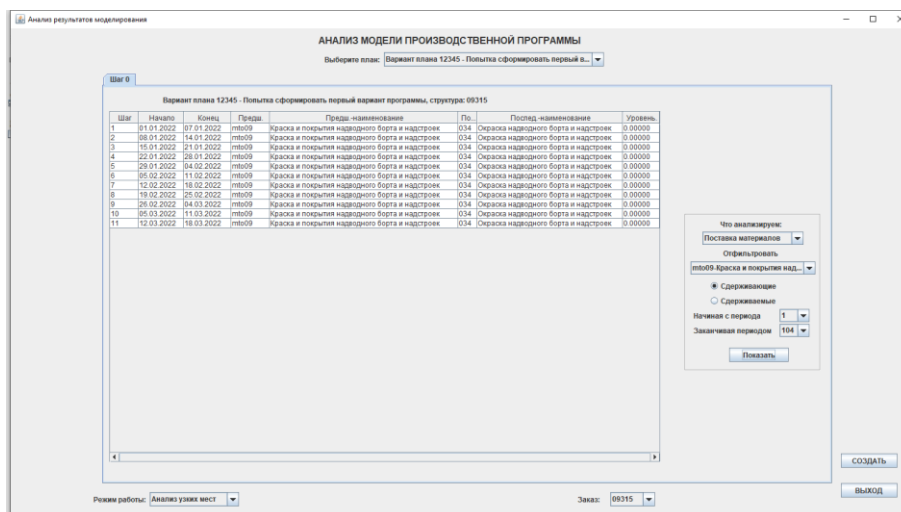


Рис. 10. Пример сведений об узких местах

Выводы

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

1. Разработанная цифровая модель и алгоритм решения рассматриваемой задачи работоспособны и имеют перспективы применения их на практике. Они формируют объёмно-календарную модель постройки заказов на основе цифровых описаний производственных ячеек, их связей и параметров типовых технологических процессов, а также укрупнённых графиков обеспечения постройки заказов документацией и материалами. При этом затраты машинного времени рабочей станции офисного типа на моделирование постройки одного заказа в течение года составляют менее 30 секунд.
2. Разработанная модель соответствует выталкивающему производству, учитывая для каждой из производственных ячеек комплектность обеспечения её работ документацией, материалами и результатами работ предшествующих по технологическому потоку ячеек. Она позволяет реализовывать разнообразные сценарии применения рассмотренной методики, включая:
 - планирование постройки заказов производственной программы за пределами временных рамок оперативного управления;
 - организационно-технологический анализ постройки заказов, включая вычисление минимального цикла постройки конкретного заказа с учётом или без учёта таких условий, как:
 - анализа обеспеченности планов материалами и РҚД;

анализ ограничений по производственной мощности ячеек.

анализа загрузки производственных ячеек, объёма заделов и выявления узких мест, что позволяет целенаправленно разрабатывать мероприятия по сжатию сроков постройки заказов.

3. Формируемые результаты планирования легко представляются в привычных для практических специалистов форме объёмно-календарных моделей с использованием таблиц и/или диаграмм, стапельного расписания и даже укрупнённого графика работ.

4. Используемый метод позволяет анализировать показатели, недоступные при использовании упрощённых методов планирования. Например, это уровень заделов (см. рис. 9) и глубокий анализ сдерживающих производство факторов,

5. Даже при использовании для целей планирования постройки заказов методов сетевого планирования использование предложенной модели позволит сформировать ценную для разработки сетевых графиков исходную информацию, позволяющую быстрее обеспечить их соответствие требованиям к производственному плану.

6. Разработанная модель при корректном использовании позволяет улучшить качество и объективность долгосрочного планирования.

7. Как указывалось выше, разработанная модель характерна для системы выталкивающего производства. Но существует перспектива развития рассмотренного метода моделирования постройки судов применительно к условиям вытягивающего производства.

Литература

1. Новохацкий В.А., Полетаев А.Ф., Столбов А.Н. Технология судостроения // Влияние показателей технологичности на процесс постройки судна. 1978. № 6.
2. Glenn J.J. Operational Research quarterly // A dynamic programming model for work scheduling in a shipyard. 1975. Т. 26, № 4ii.
3. Przechowski F., Popielsky S. Budownictwo okretowe // Metody okreslania docelowey zdolnosci produkcyjnej stochny. 1980. № 6.
4. Уайт Оливер. Управление производством и материальными запасами в век ЭВМ. Москва: Прогресс, 1978.

5. Yong Gil Lee, SuHeon Ju, Jong Hun Woo. Simulation-based planning system for shipbuilding. 2020.
6. Форрестер, Д. Мировая динамика. Москва: АСТ, 2004.
7. Куперштейн В. И. Анализ узких мест производств. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.
8. Куперштейн В.И. О совершенствовании методов долгосрочного и среднесрочного планирования постройки заказов применительно к условиям вытягивающего производства. Двенадцатая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-25), Санкт-Петербург, 2025. С. 365–374.

References

1. Novohackij V.A, Poletaev A.F., Stolbov A.N. Vliyaniya pokazatelej tekhnologichnosti na process postrojki sudna // Tekhnologiya sudostroeniya, No. 6, 1978.
2. 2.Glenn J.J. A dynamic programming model for work scheduling in a shipyard // Operational Research quarter-ly, Vol. 26, No. 4ii, 1975.
3. Przechowski F., Popielsky S. Metody okreslania docelowey zdolnosci produkcyjnej stochny // Budownictwo okretowe, No. 6, 1980.
4. Uajt O. Upravlenie proizvodstvom i material'nymi zapasami v vek EVM. Moskva: Progress, 1978.
5. Yong Gil Lee S.J.J.H.W. Simulation-based planning system for shipbuilding // www.researchgate.net. 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/342227740_Simulation-based_planning_system_for_shipbuilding (data obrashcheniya: 04.05.2025).
6. Forrester D. Mirovaya dinamika. Moskva: AST, 2003.
7. Kupershteyn V.I. Analiz uzkih mest proizvodstv. Sankt-Peterburg: POLITEKH-PRESS, 2022.
8. Kupershteyn V.I. O sovershenstvovanii metodov dolgosrochnogo i srednesrochnogo planirovaniya postrojki zakazov primenitel'no k usloviyam vytyagivayushchego proizvodstva: Dvenadcataya vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferenciya po imitacionnomu modelirovaniyu i ego primeneniyu v nauke i promyshlennosti «Imitacionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika» (IMMOD-25): Sankt-Peterburg, 2025, p. 365-374

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

Куперштейн Владимир Ильич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры технологии судостроения, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: vkuper@mail.ru

Vladimir I. Kupershteyn, Ph.D. (Eng) senior researcher, Assistant professor of the Department of shipbuilding technology, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: vkuper@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 29.04.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.12.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 20.12.2025.

Научная статья

УДК 681.39

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.030>

Оценка эффективности технологий борьбы с помехами от устройств Wi-Fi в сетях Bluetooth LE, контролирующих состояние судового оборудования

Редькин Ю.В.¹ redkin_yura@mail.ru¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф.Ушакова, г. Новороссийск, Российская Федерация

Аннотация. Для мониторинга поведения судового оборудования в разнообразных режимах работы необходимо обеспечить сбор данных от множества беспроводных датчиков, объединенных в сеть WPAN. При этом, сети беспроводных датчиков, как правило, соседствуют с сетями Wi-Fi, которые располагаются в тех же помещениях и используют тот же самый частотный диапазон. В работе описаны особенности функционирования сетей Bluetooth LE, используемых для сбора данных от беспроводных датчиков в условиях помех от устройств сети Wi-Fi. Описаны технологии FHSS и AFH, предназначенные для уменьшения влияния помех на работу сетей Bluetooth. С целью оценки их эффективности в пакете MathCAD PRIME выполнено статистическое моделирование передачи пакетов по пикосети Bluetooth LE, находящейся под воздействием помех от устройств сети Wi-Fi. Получены оценки распределения пакетов по каналам передачи, текущего и кумулятивного коэффициентов передачи, числа доступных каналов Bluetooth LE при воздействии на пикосеть помех от одного, двух и трех каналов Wi-Fi. Моделирование показало, что использование технологии FHSS уменьшает влияние помех на работу сети, но только за счет псевдослучайного выбора канала передачи. Технология AFH, основанная на отслеживании и последующем использовании каналов с низким уровнем помех, позволяет существенно снизить влияние помех от Wi-Fi устройств на работу сети Bluetooth LE. При этом, чем большую полосу частот занимают помехи от устройств Wi-Fi, тем быстрее происходит адаптация к текущей помеховой обстановке. Недостатком технологии AFH является сокращение числа используемых каналов передачи, что снижает ее помехоустойчивость к воздействию помех от других источников.

Ключевые слова: беспроводная сеть, помехи, канал передачи, карта каналов, классификация каналов, скачкообразная перестройка частоты.

Для цитирования: Редькин Ю.В. Оценка эффективности технологий борьбы с помехами от устройств Wi-Fi в сетях Bluetooth LE, контролирующих состояние судового оборудования. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 292—300. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.030.

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.030>

Evaluation of the technologies effectiveness to combat interference from Wi-Fi devices in Bluetooth LE networks monitoring the state of shipboard equipment

Yuriy V. Redkin¹ redkin_yura@mail.ru¹ Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. Monitoring the behavior of marine equipment in various operating modes requires collecting data from multiple wireless sensors integrated into a WPAN. Wireless sensor networks are typically located adjacent to Wi-Fi networks, which are located in the same premises and use the same frequency band. This paper describes the operational characteristics of Bluetooth LE networks used to collect data from wireless sensors under interference from Wi-Fi devices. FHSS and AFH technologies designed to mitigate the impact of interference on Bluetooth networks are described. To evaluate their effectiveness, statistical modeling of packet transmission over a Bluetooth LE piconet exposed to interference from Wi-Fi devices was performed using MathCAD PRIME. Estimates were obtained for packet distribution across transmission channels, current and cumulative transmission coefficients, and the number of available Bluetooth LE channels when the piconet is subject to interference from one, two, and three Wi-Fi channels. Simulations have shown that using FHSS technology reduces the impact of interference on network operation, but only through pseudo-random transmission channel selection. AFH technology, based on tracking and subsequent use of low-interference channels, significantly reduces the impact of interference from Wi-Fi devices on Bluetooth LE network operation. Furthermore, the greater the frequency band occupied by interference from Wi-Fi devices, the faster the adaptation to the current interference environment. A disadvantage of AFH technology is the reduction in the number of transmission channels used, which reduces its immunity to interference from other sources.

Keywords: wireless network, interference, transmission channel, channel map, channel classification, frequency hopping.

For citation: Yuriy V. Redkin. Evaluation of the technologies effectiveness to combat interference from Wi-Fi devices in Bluetooth LE networks monitoring the state of shipboard equipment, Marine intellectual technologies. Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 292—300. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.030.

Введение

Мониторинг поведения судового оборудования в различных режимах работы связан со сбором данных от разнообразных датчиков, контролирующих его состояние: скорости вращения механизмов, смещения их частей, вибрации, температуры и давления (жидкости и газов), расхода топлива и смазочных масел, направления движения, светового потока, силы и частоты звука. Например, основой многих технологий оценки состояния узлов машин и оборудования является мониторинг импульсных вибраций, возникающих в ходе их эксплуатации [1]. Более полное знание того, что происходит при работе судового оборудования, является основой

достоверности получаемых результатов; по этой причине при контроле работы судовых устройств требуется обеспечить мониторинг состояния множества датчиков различного назначения [2]. Как показывает практика, для оперативного развертывания сети сбора данных от большого числа датчиков применение кабельных сетей нецелесообразно (требует больших временных и финансовых затрат), а в некоторых случаях даже невозможно (если датчики требуется размещать на движущихся или вращающихся устройствах) [3]. Вследствие этого, для дистанционного мониторинга судового оборудования широко используют беспроводные персональные сети (Wireless Personal Area Network, WPAN) [4, 5] (рис. 1).

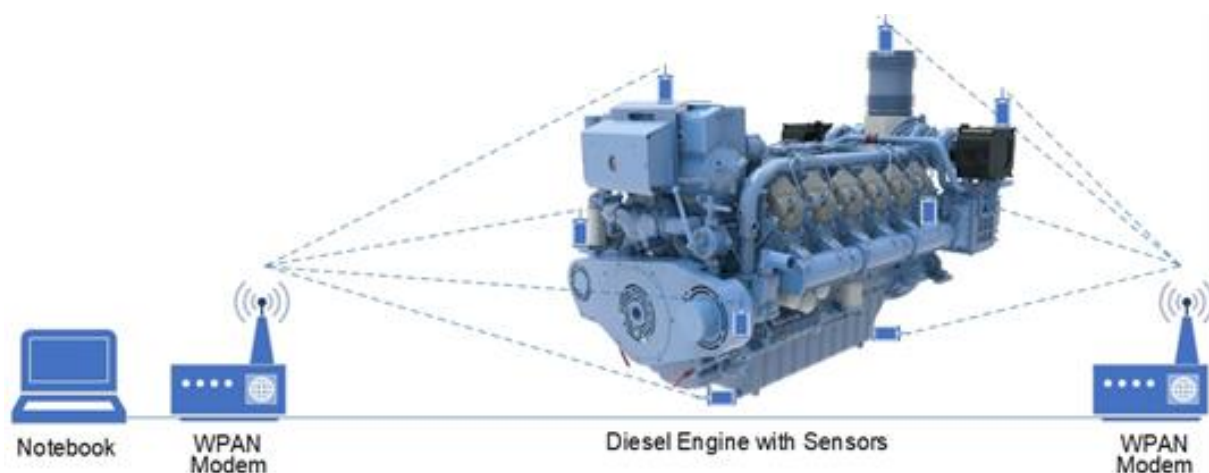


Рис. 1. Использование беспроводных сетей для сбора данных о состоянии судового оборудования

В настоящее время на транспорте и в промышленности для сбора данных от датчиков применяют следующие разновидности сетей WPAN: ZigBee, Thread и Bluetooth. Технология ZigBee базируется на стандарте IEEE 802.15.4 и ориентирована на использование в устройствах с малым энергопотреблением, небольшой дальностью связи и низкой скоростью передачи [6]. Благодаря этим особенностям сети ZigBee находят широкое применение в системах промышленной автоматизации, в частности, на транспорте для автоматизации работы судовых систем [7]. Технология Thread, основанная на стандартах IEEE 802.15.4 и 6LoWPAN, предназначена для соединения в сеть устройств с малым потреблением электроэнергии. Ее главное отличие от других технологий состоит в том, что благодаря поддержке стандарта 6LoWPAN сетевые устройства могут напрямую обмениваться пакетами данными с облачным хранилищем по протоколу IPv6 [8]. Наиболее широко распространенной технологией, основанной на стандарте IEEE 802.15.1, является Bluetooth – ее поддерживают практически все мобильные и переносные устройства современной радиоэлектроники. На данный момент технология, помимо своей базовой версии (Bluetooth Classic), имеет версию, ориентированную на работу с батарейными устройствами (Bluetooth LE) [9]. Bluetooth LE, в отличие от Bluetooth Classic, оптимизирована с целью обеспечения малого потребления энергии сетевыми устройствами и предназначена для передачи им команд, данных и мониторинга их

состояния. Благодаря этим особенностям она оказывается оптимальным выбором, когда требуется обеспечить длительную работу устройств сети от батарей [10]. Сети WPAN, основанные на других технологиях, менее востребованы и предназначены, в основном, для решения специальных задач. Необходимо отметить, что не существует универсальной технологии для построения WPAN сетей сбора данных – выбор наиболее подходящего решения зависит от конкретных требований к сети и имеющихся условий ее эксплуатации.

Применению сетей WPAN на транспорте и в промышленности для сбора данных от датчиков и передачи команд управления исполнительным устройствам посвящен ряд работ [11-14]. Однако, некоторые особенностей применения сетей WPAN на транспорте требуют дополнительного исследования. Так, на судах эти сети часто используются в замкнутых помещениях в условиях помех от работающего радиооборудования и других радиосетей. Более того, сети Wi-Fi и WPAN обычно используют один и тот же частотный диапазон 2,4 ГГц и могут располагаться в одном устройстве, создавая интенсивные помехи работе друг друга. Вследствие помех происходят потери пакетов, передаваемых по сети, и снижается ее пропускная способность, поскольку в случае утраты пакета возникает необходимость его повторной передачи. При высокой вероятности потери пакета это может привести к заметному снижению пропускной способности сети и увеличению задержки в доставке данных.

Постановка задачи

Для снижения взаимного влияния сетей применяют разнообразные приемы, уменьшающие эффект от действия помех, например, маршрутизацию передаваемых пакетов [15, 16]. Однако, одним из самых эффективных приемов считается расширение спектра передаваемых сигналов, причем сети Wi-Fi и Bluetooth используют разные технологии расширения спектра, позволяющее повысить помехоустойчивость передачи [17].

Устройства Wi-Fi, в зависимости от используемой версии стандарта IEEE 802.11, поддерживают две разновидности технологии расширения спектра. На данный момент наиболее распространенной версией, используемой для целей телекоммуникации, является IEEE 802.11b, в которой применяется метод распределения мощности сигнала по широкому частотному диапазону Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS. Этот же метод могут использовать устройства, работающие в стандарте IEEE 802.11g (как комбинированный режим DSSS-OFDM). Метод DSSS основан на том, что частотный диапазон передаваемого сигнала расширяется путем замены каждого передаваемого бита 11-битной последовательностью Баркера (Barker sequence), обладающей наилучшими свойствами шумоподобности среди известных псевдослучайных последовательностей. Благодаря этому сигнал занимает широкую полосу частот в диапазоне, определяемой номером канала передачи, и выглядит при этом как шум в этой области частот. Всего для Wi-Fi определено 13 частотных каналов, но только три из них не перекрываются друг с другом: wch1 (2402-2422 МГц), wch6 (2427-2447 МГц) или wch7 (2432-2452) и wch11 (2452-2472 МГц) [18].

В Bluetooth Classic используется иная технология расширения спектра, основанная на скачкообразной псевдослучайной перестройке несущей частоты (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS). В ней передача осуществляется по 80 частотным каналам шириной 1 МГц со скачкообразной сменой несущей частоты, вследствие чего мощность передаваемого сигнала равномерно распределяется по диапазону 2400-2480 МГц. Благодаря большому числу каналов передачи и их псевдослучайной смене, даже при наличии помех в этом диапазоне частот, часть пакетов будет доставлена получателю [19].

В стандарте Bluetooth LE этот же диапазон частот разделен на 40 каналов (ch0-ch39) шириной 2 МГц. Каналы ch0...ch36 предназначены для передачи пакетов данных, а каналы ch37-ch39 – для рассылки объявлений. Каналы объявления используются для поиска соседних устройств, установления соединения с ними, широковещательных рассылок, тогда как каналы данных предназначены для двустороннего обмена между соседними устройствами. При этом частоты каналов объявления (ch37-ch39) выбраны таким образом, чтобы минимизировать перекрытие с каналами wch1, wch6/wch7 и wch11 стандарта IEEE 802.11b. Особенностью технологии скачкообразной перестройки частоты, используемой в Bluetooth LE, является адаптация используемых каналов под существующие помеховые условия передачи. С этой целью при обмене пакетами с узлами отслеживаются каналы с высоким уровнем помех и исключаются из списка используемых. Вследствие этого, технология получила название адаптивной скачкообразной перестройки частоты (Adaptive Frequency Hopping, AFH) [20].

Целью настоящей работы является оценка эффективности использования технологий AFH и FHSS для борьбы с помехами от устройств Wi-Fi, работающих в стандарте IEEE 802.11b на одном, двух и трех неперекрывающихся каналах.

Моделирование работы сети Bluetooth в условиях помех

Поскольку системы Bluetooth LE и Wi-Fi не являются синхронными, их взаимное влияние количественно можно оценить только с помощью статистических оценок потерь передаваемых пакетов вследствие помех от другой сети. С этой целью в пакете MathCAD Prime проведено моделирование работы пикосети Bluetooth LE, представленной двумя своими узлами (Master и Slave), приемные устройства которых находятся под действием помех от устройств Wi-Fi, работающих в стандарте IEEE 802.11b (рис. 2). В ходе моделирования контролировался процесс передачи пакетов данных по частотным каналам пикосети при воздействии на них помех от одного, двух и трех неперекрывающихся каналов сети Wi-Fi (wch1, wch7 и wch11). При этом взаимодействие между собой устройств сети Wi-Fi не моделировалось [21].

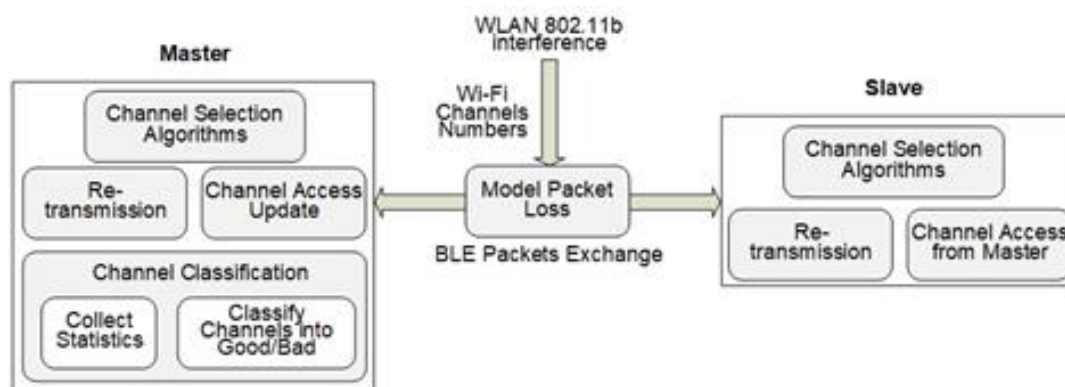


Рис. 2. Модель взаимодействия узлов пикосети при воздействии на нее помех от устройств Wi-Fi

Как видно из рис. 2, за взаимодействие узлов сети отвечает Master, который: периодически получает от периферийного узла Slave данные о результатах передачи ему пакетов, обновляет на их основе карту каналов (Channel Access) и использует ее для передачи следующей партии пакетов узлу Slave.

Взаимное расположение частотных каналов сети Bluetooth LE и устройств Wi-Fi, используемых при моделировании пикосети, показано на рис. 3. Как следует из этого рисунка, при работе Wi-Fi устройств на любом из каналов (wch1, wch7, wch11), под действием помех оказываются 9 из 37 каналов данных Bluetooth LE. При работе Wi-Fi устройств на

двух каналах помехи будут присутствовать примерно на половине каналов (18 из 37), а при использовании трех Wi-Fi каналов большая часть (27 из 37) каналов Bluetooth LE будет находиться под действием помех. Вследствие воздействия помех возможна потеря передаваемых пакетов. Возникает ошибка или нет, зависит от соотношения сигнал/помеха, которое, в свою очередь, зависит от излучаемой мощности трансиверов и расстояния между ними. При моделировании полагалось, что присутствие помех на любом канале Bluetooth LE приводит к потере пакетов, передаваемых по этому каналу с вероятностью 100%.

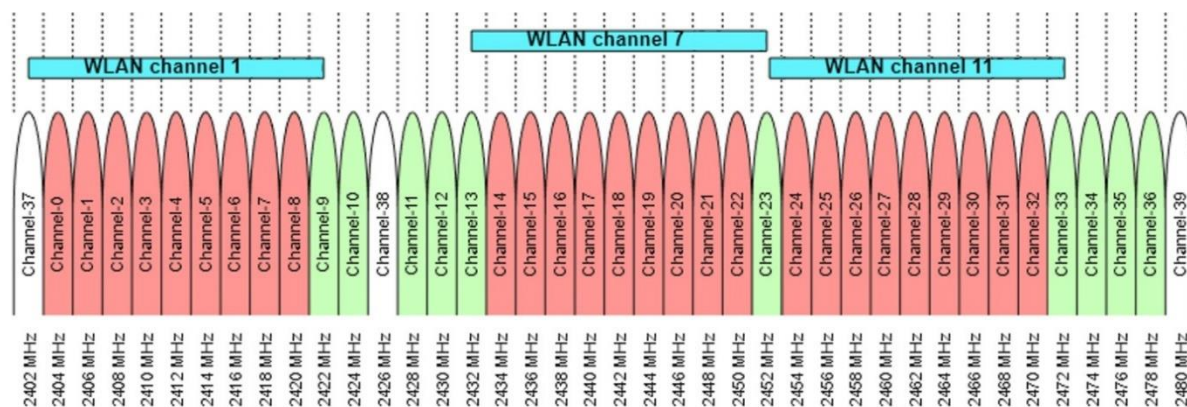


Рис. 3. Взаимное расположение каналов передачи Bluetooth LE и устройств Wi-Fi

Моделировались два режима работы пикосети рис. 2: с использованием базового механизма FHSS и технологии AFH. Для оценки эффективности работы этих технологий исследовалась передача от узла Master к узлу Slave 512 пакетов данных, разбитых на партии (hop) по 32 пакета. После передачи каждой партии пакетов оценивалась доступность каналов передачи ChanAcc и подсчитывалось число переданных PackTr и потерянных PackFl пакетов на каждом канале. Во время моделирования канал для передачи очередного пакета выбирался из карты ChanAcc доступных каналов случайным образом. При использовании технологии FHSS полагалось, что все каналы в карте ChanAcc доступны для передачи. При включении технологии AFH после оценки результатов передачи очередной партии пакетов карта ChanAcc корректировалась – каналы, пораженные помехами, исключались из списка доступных. После передачи всех 512 пакетов рассчитывались коэффициенты передачи по сети и число доступных каналов как функции от номера партии пакетов. Для получения достоверных оценок результаты усреднялись по 10^3 сеансам связи.

Блок схема алгоритма взаимодействия узлов пикосети при воздействии на ее каналы помех от устройств Wi-Fi представлена на рис. 4. Как видно из этого рисунка, на первом этапе выполняется инициализация режима работы пикосети: выбирается моделируемая технология передачи (AFH или FHSS); устанавливается число (StepNum) передаваемых партий пакетов и число (PackNum) пакетов в партии, пороги числа переданных по

каналу пакетов (PackThr) и допустимых потерь (Fithr); в зависимости от числа и номеров используемых Wi-Fi каналов выбирается маска (Mask) каналов Bluetooth LE, пораженных помехами; сбрасываются счетчики числа переданных (PackTr и PackTrCum) и потерянных (PackFl и PackFICum) пакетов, а также инициализируется карта (ChanAcc) каналов Bluetooth LE – все каналы помечаются в ней как “хорошие”.

На втором этапе имитируется передача пакетов по пикосети партиями по PackNum штук: выбирается случайным образом номер канала CurCh для передачи очередного пакета; при использовании технологии AFH выбранный канал проверяется на доступность в карте ChanAcc и, если он “плохой”, то случайным образом выбирается другой, “хороший” канал; счетчик PackTr числа пакетов, переданных по каналу CurCh увеличивается на единицу; после этого номер канала CurCh сравнивается с маской Mask, и, если данный канал находится под действием помех от устройств Wi-Fi, то на единицу увеличивается счетчик PackFl числа потерянных пакетов.

После передачи очередной партии PackNum пакетов определяется общее (кумулятивное) число переданных PackTrCum и кумулятивное число потерянных пакетов PackFICum по каждому каналу. При использовании технологии AFH оценивается доступность каналов передачи и корректируется карта ChanAcc: если число переданных по каналу пакетов больше или равно PackThr и при этом превышен допустимый порог потерь Fithr, то канал в этой карте отмечается как “плохой”, иначе его статус не изменяется.

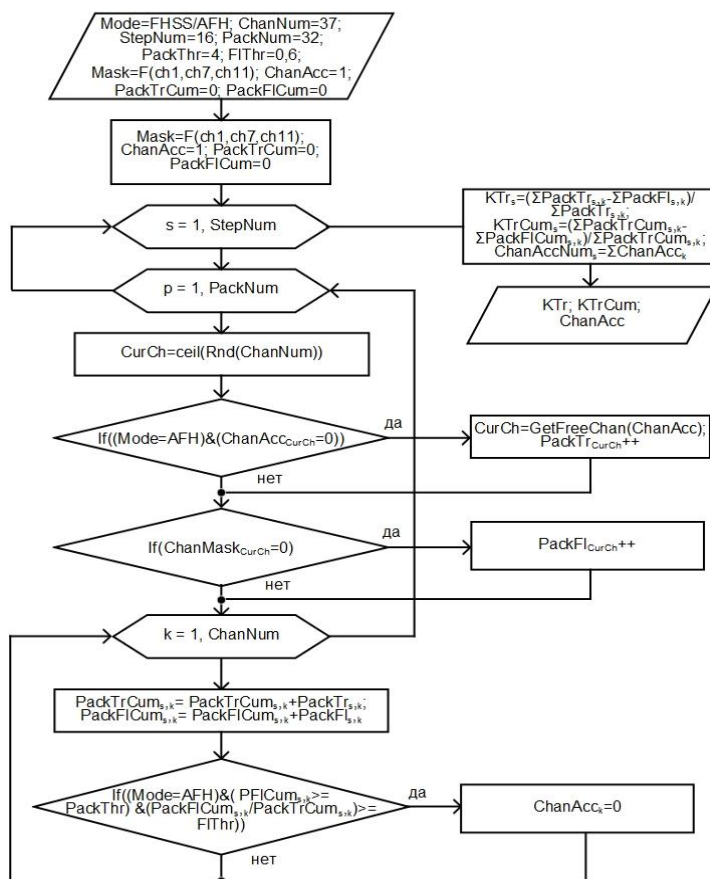
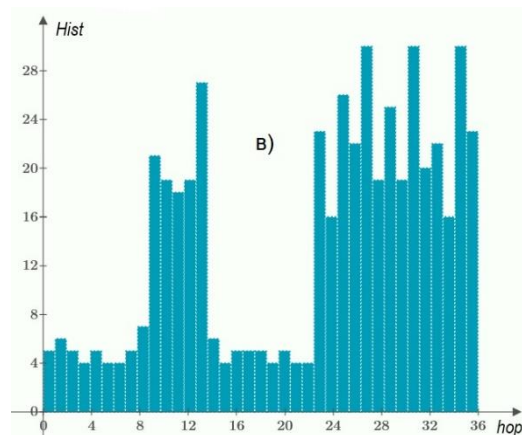
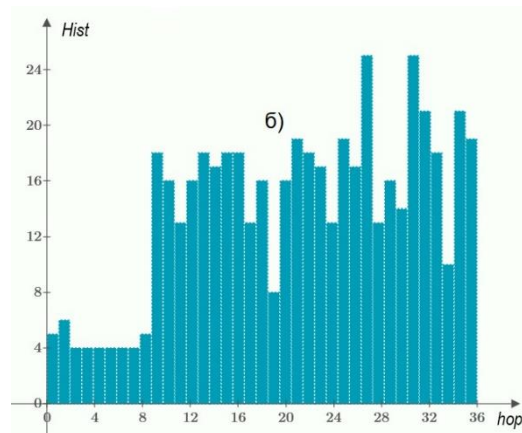
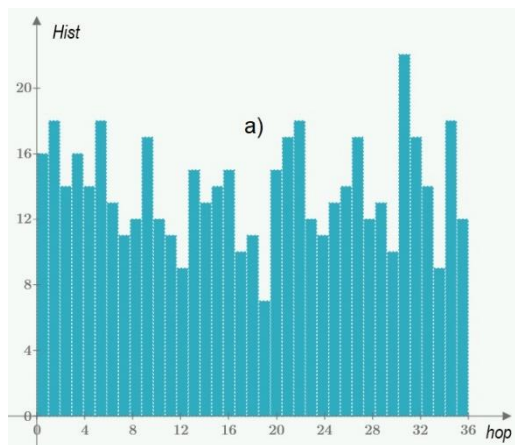


Рис. 4. Блок схема алгоритма взаимодействия узлов пикосети Bluetooth LE

На третьем этапе после передачи всех StepNum партий пакетов обрабатываются полученные результаты и рассчитываются: коэффициент передачи по сети KTr, кумулятивный коэффициент передачи KTrCum и число доступных каналов ChanAccNum, как функции от номера переданной партии пакетов.

Результаты моделирования

На рис. 5 представлены распределения числа переданных пакетов по каналам, полученные в ходе одного сеанса связи, а на рис. 6-8 – усредненные оценки числа доступных каналов и коэффициентов передачи, для технологий FHSS и AFH.



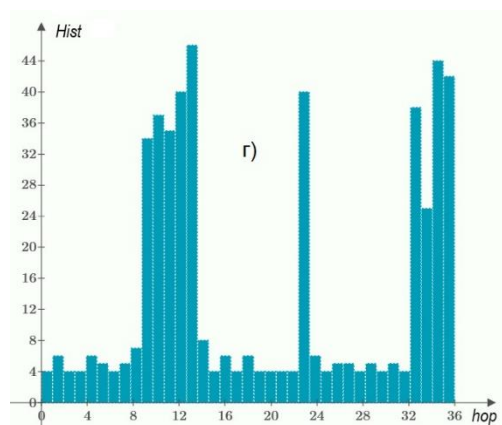


Рис. 5 – Распределение числа переданных пакетов по каналам Bluetooth LE при наличии помех от одного, двух и трех каналов Wi-Fi

а) технология FHSS; б) технология AFH, помехи от канала wch1; в) технология AFH, помехи от каналов wch1 и wch7; г) технология AFH, помехи от каналов wch1, wch7 и wch11

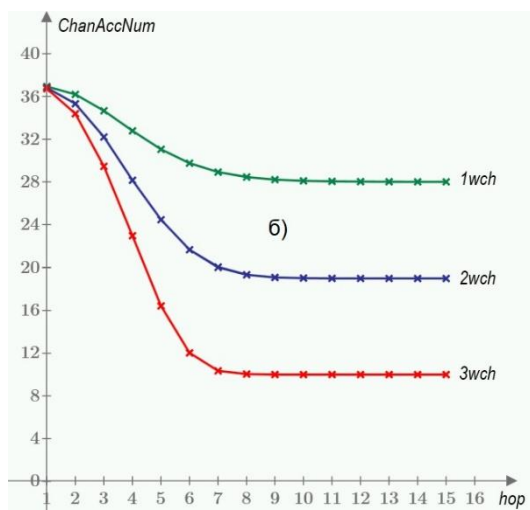
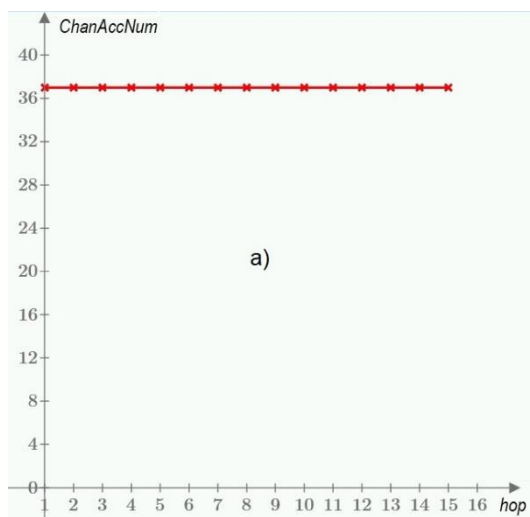


Рис. 6 – Изменение числа доступных каналов при наличии помех от одного, двух и трех каналов Wi-Fi а) технология FHSS; б) технология AFH

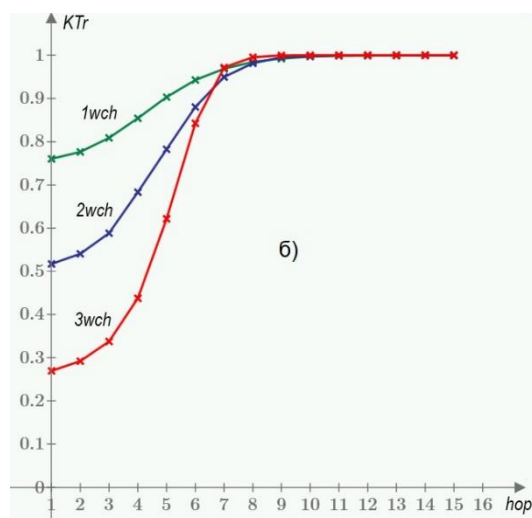
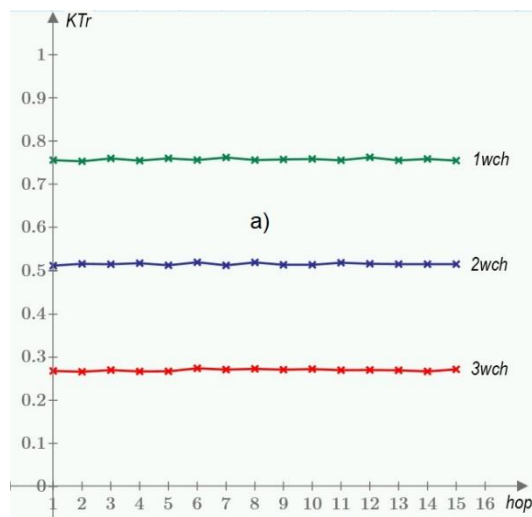
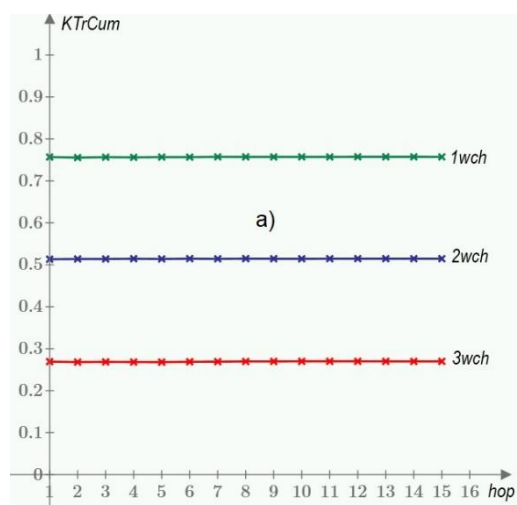


Рис. 7 – Изменение коэффициента передачи при наличии помех от одного, двух и трех каналов Wi-Fi а) технология FHSS; б) технология AFH



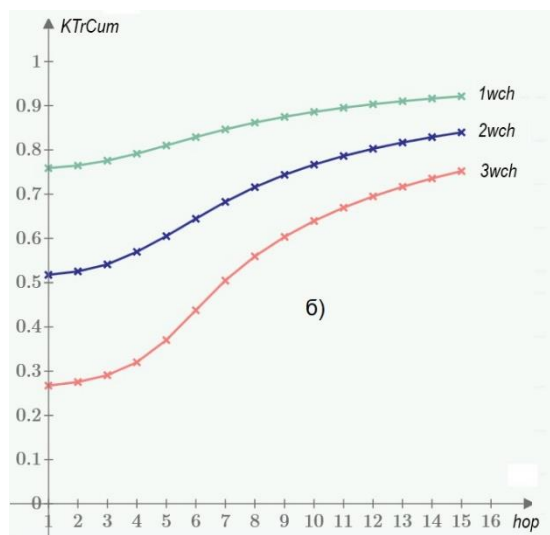


Рис. 8 – Изменение кумулятивного коэффициента передачи при наличии помех от одного, двух и трех каналов Wi-Fi а) технология FHSS; б) технология AFH

Как видно из рис. 6,а, при использовании технологии FHSS передача пакетов ведется по всем 37 частотным каналам – распределение номеров используемых каналов близко к равномерному (рис.5,а). Как следствие, часть пакетов, передаваемых по сети, утрачивается и коэффициент передачи всегда меньше единицы. Результат зависит от числа мешающих каналов Wi-Fi: если Wi-Fi устройства используют для передачи только один канал, то среднее значение коэффициента составляет 0,76, если два – то 0,51, а если передача ведется по трем каналам Wi-Fi, то 0,27 (рис. 7,а).

При использовании технологии AFH в момент начала взаимодействия узлов Master и Slave наблюдаемое распределение пакетов по каналам передачи стремится к равномерному, как и в базовой технологии FHSS. Коэффициент передачи KTr по пикосети в этот момент такой же, как и в технологии FHSS и зависит от числа используемых каналов Wi-Fi (рис. 7,б). Однако, после выполнения устройством Master нескольких переклассификаций каналов, распределение пакетов перестает быть равномерным (рис. 5,б – 5,г). Так, как видно из рис. 5,б, при работе Wi-Fi устройств на канале wch1, каналы Bluetooth LE ch0-ch8, после потери на каждом из них 4-6 пакетов, исключаются из списка “хороших” и больше не используются для передачи. Аналогично, при работе Wi-Fi устройств на канале wch7 исключаются каналы ch14-ch22, а при работе Wi-Fi устройств на канале wch11 – каналы ch24-ch24. При этом для определения всех каналов Bluetooth LE, пораженных помехами от устройств Wi-Fi, требуется не более 9-11 переклассификаций (таблица 1). Из рис. 7,б и таблицы 1 следует, что чем больше число используемых каналов Wi-Fi, тем выше скорость увеличения коэффициента KTr и тем быстрее он достигает единицы.

Таблица 1

Число партий пакетов, необходимых для исключения каналов, пораженных помехами

Число неперекрывающихся каналов Wi-Fi	1	2	3
Число партий пакетов	11	10	9

После завершения классификации всех каналов распределение пакетов становится неравномерным (рис. 5,б – 5,г): на частотных каналах, занимаемых сигналами Wi-Fi, передача пакетов прекращается, а оставшаяся часть пакетов равномерно распределяется по “хорошим” каналам. При этом, после завершения переклассификаций каналов, коэффициент передачи по каналу Master-Slave возрастает до единицы (рис. 7,б).

Кумулятивный коэффициент передачи KTrCum при использовании технологии FHSS практически совпадает с коэффициентом KTr, однако график изменения коэффициента KTrCum имеет более сглаженный вид вследствие его усреднения. При использовании технологии AFH коэффициент KTrCum, как и KTr, также стремится к единице, но с некоторой задержкой вследствие потерь пакетов на начальном этапе классификации. При этом, чем больше число каналов используют устройства Wi-Fi, тем больше разница в значениях коэффициентов, но тем выше скорость увеличения KTrCum.

Заключение

Как показало проведенное моделирование пикосети Bluetooth LE, обе технологии (FHSS и AFH) позволяют уменьшить влияние помех от устройств Wi-Fi на ее работу. Однако, в технологии FHSS снижение влияния помех достигается путем псевдослучайного изменения номера канала передачи. Вследствие этого, часть пакетов, передаваемых по пикосети Bluetooth LE, утрачивается и коэффициент передачи по ней всегда меньше единицы. Его величина уменьшается с ростом числа мешающих каналов Wi-Fi и составляет: 0,76 для одного канала, 0,51 для двух каналов и 0,27 для трех неперекрывающихся каналов Wi-Fi. Кумулятивный коэффициент передачи по пикосети при этом практически совпадает с текущим коэффициентом передачи.

В технологии AFH, благодаря классификации каналов по уровню потерь и передаче пакетов только по каналам с низким уровнем потерь, повышается вероятность их доставки даже в условиях, когда помехи от устройств Wi-Fi занимают большую часть частотного диапазона Bluetooth LE. После завершения классификации всех каналов Bluetooth LE коэффициент передачи по пикосети достигает единицы независимо от числа мешающих каналов Wi-Fi, а его минимальное значение, наблюдаемое в начале классификации каналов, такое же, как у технологии FHSS. Кумулятивный коэффициент передачи по пикосети также стремится к единице, но с некоторой задержкой вследствие потерь пакетов при классификации каналов. При этом, чем большую полосу частот занимают сигналы от устройств Wi-Fi, тем быстрее отслеживаются каналы Bluetooth LE, пораженные помехами, и быстрее достигается максимальный коэффициент передачи по пикосети.

Таким образом, использование технологии AFH в условиях помех от устройств Wi-Fi существенно снижает их влияние на передачу по сети Bluetooth LE – после адаптации узлов сети к существующей помеховой обстановке каналы, пораженные помехами, исключаются из используемых и коэффициент передачи по сети возрастает до единицы. Однако, поскольку это достигается путем уменьшения числа используемых каналов, то

неизбежно снижается устойчивость работы сети при воздействии на нее электромагнитных помех от других радиоэлектронных устройств и сетей, присутствующих в судовых помещениях, где установлено контролируемое оборудование.

Литература

1. Особенности диагностики машин по импульсной вибрации / А.В. Барков [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. 2025. N 2 часть 1. С. 236-243. DOI: 10.37220/MIT.2025.68.2.029
2. Коновалов П.О., Иванченко А.А., Ларионов Г.Л. Опыт развития и применения в эксплуатации систем мониторинга технического состояния судовых ДВС // Транспортное дело России. 2023. № 4. С. 215-218. DOI: 10.52375/20728689_2023_4_215.
3. Miguel F. Acevedo. Real-Time Environmental Monitoring: Sensors and Systems. New York, CRC Press, 2024, 425 p.
4. Ibrahim M. M. El Emary. Wireless Sensor Networks: From Theory to Applications. New York, CRC Press, 2013, 778 p.
5. Industrial Wireless Sensor Networks: Monitoring, Control and Automation. Edited by Ramakrishna Budampati and Soumitri Kolavennu. Cambridge, University Press, Elsevier, 2016, 235 p.
6. ZigBee Technology Website [Электронный ресурс] URL : <http://zigbee.ru/> (дата обращения: 7.12.2025)
7. Redkin Yu.V. Features of building wireless ship networks based on Zigbee // Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis (MIP-2023'AS): Proceedings of the XXVIII-th International Open Science Conference, Yelm, WA, USA. Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House LLC, 2023. P. 172-178.
8. Thread Group Website [Электронный ресурс] URL : <https://www.threadgroup.org/> (дата обращения: 7.12.2025)
9. Bluetooth Technology Website [Электронный ресурс] URL: <https://www.bluetooth.com/> (дата обращения: 7.12.2025)
10. Mohammad A. Intro to Bluetooth Low Energy. Novel Bits, 2018. 110p.
11. Ashish Bagwari, Geetam Singh Tomar, Jyotshana Bagwari, Jorge Luis Victoria Barbosa. Advanced Wireless Communication and Sensor Networks: Applications and Simulations. CRC Press, 2023. 355p.
12. Simulation of a vessel sensor network of ZigBee standard / Buzenkov I.I. [et al.] // Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual, 15-16 June 2021 year. Novorossiysk, Virtual, 2021. P. 012075. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012075.
13. Redkin Y.V. About the problems of data transmission over wireless industrial networks // Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis: Proceedings of the XXV-th International Open Science Conference (Yelm, WA, USA, January 2020) / Editor in Chief Dr. Sci., Prof. O. Ja. Kravets. Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2020. P.260-265.
14. Bensky, Alan. Short-range Wireless Communication, 3rd Edition. Cambridge: Elsevier, 2019. 634 p.
15. Иванов В.Э., Левенец А. В., Чье Ен Ун. Проблемно-ориентированные сенсорные сети: практический подход. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015, 219 с.
16. Прозоровский Е.Е., Редькин Ю.В. Повышение эффективности методов маршрутизации в беспроводных сетях систем телеметрии // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-4(52). С. 92-96. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.075.
17. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Техносфера, 2006, 288 с.
18. Технологии современных беспроводных сетей Wi-Fi: учебное пособие / под общей редакцией А.В. Пролетарского. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, 446 с.
19. Bluetooth Technology Website [Электронный ресурс] URL : <https://www.bluetooth.com/> (дата обращения: 7.12.2025)
20. Specification of the Bluetooth System. Volume 6. Low Energy Controller [Электронный ресурс] URL: <https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/Files/Specification/HTML/Core-54/out/en/low-energy-controller.html> (дата обращения: 7.12.2025)
21. Редькин Ю.В., Хекерт Е.В., Макаревич Т.А. Сравнение технологий защиты сетей Bluetooth LE от помех Wi-Fi устройств // Эксплуатация морского транспорта. 2025. N 3 (116). С. 126-132. Prozorovskiy, E. E., Redkin Yu. V. Modification of the routing protocol for radio telemetry systems // Modern informatization problems in simulation and social technologies (MIP-2024'SCT) : Proceedings of the XXIX-th International Open Science Conference. – Yelm, WA, USA. Science Book Publishing House LLC. – 2024. P. 195–200.

References

1. Osobennosti diagnostiki mashin po impul'snoj vibracii [Features of machine diagnostics using pulse vibration] / A.V. Barkov [i dr.] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2025. N 2 chast' 1. P. 236-243. DOI: 10.37220/MIT.2025.68.2.029
2. Kononov P.O., Ivanchenko A.A., Larionov G.L. Opyt razvitiya i primeneniya v ehkspluatatsii sistem monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya sudovykh DVS [Experience in the development and application of systems for monitoring the technical condition of marine internal combustion engines] // Transportnoe delo Rossii. 2023. № 4. P. 215-218. DOI: 10.52375/20728689_2023_4_215.
3. Miguel F. Acevedo. Real-Time Environmental Monitoring: Sensors and Systems. New York, CRC Press, 2024, 425 p.

4. Ibrahim M. M. El Emary. Wireless Sensor Networks: From Theory to Applications. New York, CRC Press, 2013, 778 p.
5. Industrial Wireless Sensor Networks: Monitoring, Control and Automation. Edited by Ramakrishna Budampati and Soumitri Kolavennu. – Cambridge, University Press, Elsevier, 2016, 235 p.
6. ZigBee Technology Website [Electronic resource] URL : <http://zigbee.ru/> (accessed 7.12.2025)
7. Redkin Yu.V. Features of building wireless ship networks based on Zigbee. Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis (MIP-2023'AS): Proceedings of the XXVIII-th International Open Science Conference, Yelm, WA, USA. Yelm, WA, USA, Science Book Publishing House LLC, 2023. P. 172-178.
8. Thread Group Website [Electronic resource] URL: <https://www.threadgroup.org/> (accessed 7.12.2025)
9. Bluetooth Technology Website [Electronic resource] URL: <https://www.bluetooth.com/> (accessed: 7.12.2025)
10. Mohammad A. Intro to Bluetooth Low Energy. Novel Bits, 2018, 110p.
11. Ashish Bagwari, Geetam Singh Tomar, Jyotshana Bagwari, Jorge Luis Victoria Barbosa. Advanced Wireless Communication and Sensor Networks: Applications and Simulations. CRC Press, 2023, 355p.
12. Simulation of a vessel sensor network of ZigBee standard / Buzenkov I.I. [et al.] // Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual, 15-16 June 2021 year. Novorossiysk, Virtual, 2021. P. 012075. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012075.
13. Redkin Y.V. About the problems of data transmission over wireless industrial networks // Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis: Proceedings of the XXV-th International Open Science Conference (Yelm, WA, USA, January 2020) / Editor in Chief Dr. Sci., Prof. O. Ja. Kravets. Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2020. P.260-265.
14. Bensky, Alan. Short-range Wireless Communication, 3rd Edition. Cambridge: Elsevier, 2019. 634 p.
15. Ivanov V.EH., Levenec A. V., Ch'e En Un. Problemno-orientirovannye sensornye seti: prakticheskiy podkhod [Domain-Specific Sensor Networks: A Practical Approach]. Khabarovsk: Izd-vo Tikhookean. gos. un-ta, 2015, 219 p.
16. Prozorovskiy E.E., Red'kin YU.V. Povyshenie ehffektivnosti metodov marshrutizatsii v besprovodnykh setyakh sistem telemekhnologii [Improving the efficiency of routing methods in wireless telemetry networks] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. № 2-4(52). P. 92-96. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.075.
17. Shahnovich I.V. Sovremennyye tekhnologii besprovodnoy svyazi [Modern wireless communication technologies]. Izd. 2-e, ispr. i dop. M.: Tekhnosfera, 2006, 288 p.
18. Tekhnologii sovremennykh besprovodnykh setey Wi-Fi [Modern Wi-Fi wireless network technologies]: uchebnoe posobie / pod obshchey redakciey A.V. Proletarskogo. M.: Izd-vo MGTU im. N.EH. Bauman, 2017, 446 p.
19. Bluetooth Technology Website [Electronic resource] URL : <https://www.bluetooth.com/> (accessed 7.12.2025)
20. Specification of the Bluetooth System. Volume 6. Low Energy Controller [Electronic resource] URL: <https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/Files/Specification/HTML/Core-54/out/en/low-energy-controller.html> (accessed 7.12.2025)
21. Red'kin YU.V., Khkert E.V., Makarevich T.A. Sravnenie tekhnologiy zashchity setey Bluetooth LE ot pomekh Wi-Fi ustroystv [Comparison of Bluetooth LE network protection technologies against Wi-Fi interference] // Ekhsplyuatsiya morskogo transporta. 2025. N 3 (116). P. 126-132.

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

Редькин Юрий Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф.Ушакова, 353918, Новороссийск, проспект Ленина, 93, Российская Федерация, e-mail: redkin_yura@mail.ru

Yuriy V. Redkin, Ph. D. (Eng), Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of radio electronics and information technology, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenina Av. 93, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, e-mail: redkin_yura@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 26.11.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 07.01.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 15.01.2026.

Научная статья

УДК 656.052.1:519.172

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.031>**Метод задания графа дискретной пространственно-временной модели оптимизации маршрута судна в дрейфующих льдах**Звягина Т.Л.¹ tlzvyagina@gmail.com¹Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого

Аннотация. Навигация в условиях динамической ледовой обстановки предъявляет повышенные требования к моделям и методам, применяемым для вычисления оптимального маршрута. В отличие от оптимизации пути в статических условиях, сложность аналогичной задачи при учете дрейфа ледовых объектов существенно возрастает. Классическим подходом к решению задач погодной маршрутной оптимизации считается метод изохрон. Однако его итеративная реализация имеет недостатки по отношению к поиску пути во льдах, например, попадание в ловушки лабиринтов, к которым часто можно отнести и ледовую обстановку.

Для решения задачи поиска оптимального маршрута в условиях дрейфующих льдов в настоящей работе предложено использовать модель ориентированного ациклического графа в пространстве-времени. Геометрия ячеек графа в этой модели определяется ледовым сопротивлением судна. Разработанный метод сращивания узлов обеспечивает возможность оказаться в одном и том же месте и в одно и то же время разными маршрутами, что открывает возможности для двухкритериальной оптимизации.

Сложность метода относительно невысока, что позволяет применять его для практических расчетов на современных персональных компьютерах. В работе приведен пример использования метода для ледовой обстановки южной части моря Баффина (Арктика).

Ключевые слова: пространственно-временной граф, математическая модель, оптимизация маршрута, ледовая обстановка.

Для цитирования: Звягина Т.Л. Метод задания графа дискретной пространственно-временной модели оптимизации маршрута судна в дрейфующих льдах, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 301—309. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.031.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.031>**A graph setting method for a discrete spatio-temporal model for vessel route optimization in drifting ice**Tatiana L. Zvyagina¹ tlzvyagina@gmail.com¹Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

Abstract. Navigation in dynamic ice conditions places high demands on models and methods used for optimal routing. Unlike route optimization in static conditions, the complexity of the problem increases significantly when ice drift is considered. A classic approach to weather routing problem is the isochrone method. However, its iterative implementation to ice routing demonstrates unwanted issues, such as falling into traps when traversing an ice conditions labyrinth environment.

To solve the problem of finding the optimal route in drifting ice, this paper proposes a space-time directed acyclic graph (DAG) model. The geometry of the graph cells in this model is determined by the vessel's ice resistance. The developed node-merging method allows us to reach the same location at the same time via different routes in the DAG model, opening opportunities for two-criteria optimization.

The method's relatively low complexity allows it to be used for practical calculations on modern personal computers. The paper provides an example of using the method for the ice conditions of the southern part of the Baffin Bay (the Arctic).

Keywords: spatio-temporal graph, mathematical model, route optimization, ice conditions.

For citation: Tatiana L. Zvyagina. A graph setting method for a discrete spatio-temporal model for vessel route optimization in drifting ice, Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 301—309. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.031.

Введение

Основные акватории с морским льдом принадлежат морям Северного Ледовитого океана и океанским водам вокруг Антарктиды. Доступность транспортировки по морю в высоких широтах Северного полушария необходима для успешной работы промышленных и горнодобывающих предприятий, а также, снабжения населенных

пунктов Арктических регионов. Полярный регион южной части имеет большое значение для исследовательского сообщества, поскольку он является важным индикатором изменения климата [1].

Математические модели для оптимизации навигации должны быть разработаны для более эффективного и безопасного транспортного сообщения на море. Это особенно важно для

ледовой маршрутизации, так как она связана с повышенным расходом топлива, увеличением времени, необходимого для преодоления маршрута, а также рисками повреждения судна. Навигация в покрытых льдом акваториях имеет ряд особенностей по сравнению с навигацией на открытой воде: пространственная и временная неоднородность среды, сильное влияние ледовых условий на ходовые качества судов, а также необходимость использования дополнительных источников данных.

В отличие от самолетов или автомобилей, которые при перемещении должны придерживаться трасс, на глубокой воде судно может выбирать произвольное направление движения руководствуясь соответствующими правилами [3]. Эта степень свободы делает задачу планирования маршрутов судов более комплексной, поскольку существует бесконечное число возможных маршрутов между двумя заданными точками в непрерывном пространстве. Так, способ дискретизации пространства становится одним из важнейших параметров для успешного нахождения оптимальных маршрутов судов [4].

Анализ существующих подходов представления акватории в пространстве-времени

В общем случае способ пространственно-временной дискретизации акватории зависит от требований, целей и критериев оптимизации маршрута, доступных источников данных, характеристик судна, а также от вычислительных мощностей оборудования и запрашиваемой точности результатов [5]. Кроме того, изменчивость внешних условий и их влияние на ходовые качества судна должны быть учтены в предлагаемых подходах.

Одним из наиболее известных способов пространственно-временного описания акватории является итеративный метод построения изолиний равного уровня, в частности метод изохрон [6]. Исходный вариант изохронного метода имеет экспоненциальную сложность, поскольку генерация точек нового временного уровня выполняется для каждой дискретной точки предыдущего уровня.

Известно множество попыток модифицировать изохронный метод, например, исключать «неперспективные» точки [7], отсекал пути со слишком большим отклонением от ортодромии на ранних этапах поиска [8], вводить эвристические компоненты или алгоритмы с «жадным выбором» на второй половине поиска для обеспечения более надежной сходимости к финишной точке [8].

Такие подходы в основном нацелены на решение более общей проблемы, называемой «метеорологической маршрутизацией» (с англ. *weather routing*), и применение их для решения задач «ледовой маршрутизации» (с англ. *ice routing*) может быть неэффективно. Анализируя фактические маршруты судов в ледовых условиях, можно заметить, что зачастую эти траектории представляют собой сложные лабиринтные кривые [9], в то время как траектории судов, идущих по открытой воде, часто не сильно отклоняются от ортодромии [10]. Это связано с тем, что при планировании маршрутов судов во льдах обычно отдается предпочтение локальным участкам с более низкой сплоченностью

льда и ледовым коридорам, даже если это сильно отразится на общей протяженности маршрута.

Например, в работе [9] была смоделирована особая ледовая обстановка, чтобы показать пример неэффективной работы изохронного подхода в применении к задаче «ледовой маршрутизации» (Рис. 1). Оптимизированный маршрут из точки А в точку В оказался проложен через тяжелый лед из-за наличия ловушки канала открытой воды. Такой маршрут занял значительно больше времени по сравнению с обходным маршрутом на открытой воде [9].

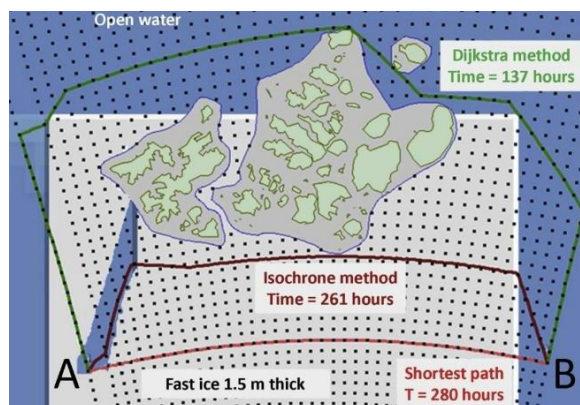


Рис. 1. Пример ледовой обстановки, для которой традиционный изохронный подход дает неприемлемые результаты [9]

Другим способом пространственно-временного описания акватории является дискретизация области при помощи графовой сети. Существующие подходы можно разделить на 2 категории. К первому классу подходов можно отнести использование статического графа с динамическими весовыми функциями вершин или ребер. Для учета временной составляющей при пространственно-временной оптимизации маршрутов на таких графах авторы обычно прибегают к использованию эвристических алгоритмов, например A^* , D^* [11, 12].

Во втором классе подходов предлагается моделировать граф таким образом, чтобы его узлы хранили пространственно-временное представление акватории, а ребра – переходы между этими состояниями. Главным преимуществом такого подхода является возможность использования алгоритмов обхода графов без дополнительных эвристик, например алгоритма Дейкстры или волнового алгоритма [13, 14]. Недостатком такого подхода является чрезмерное разрастание графа, моделирующего различные пространственно-временные ситуации, что отражается и на времени исполнения алгоритма обхода.

В настоящей работе представлен новый метод построения пространственно-временного графа, реализующего идею изохронных методов в дискретной модели. Метод способен эффективно отражать изменчивость ледовой обстановки во времени, а также учитывать пространственную неоднородность льда.

Существующие модели прогнозирования ледовой обстановки

Планирование маршрута в ледовой обстановке наиболее эффективно, если известен надежный

ледовый прогноз на время, требуемое для преодоления интересующей акватории. Доступность таких прогнозов неодинакова для различных регионов с замерзающими морями. Для Балтийского моря численные модели циркуляции атмосферы и гидросферы, включающие в себя средства ледового прогноза, разрабатывались в начале 1990-х параллельно в Германии (BSH) и в Швеции (SMHI). Первая такая модель с разрешением 5 км, запущенная Шведским SHMI в 1991 году, использовала ежедневные прогнозы погоды и приток-отток морской воды через Датские проливы. С 1994 года для целей прогноза этой организацией стала использоваться Принстонская океаническая модель, имеющая горизонтальное разрешение 10 км и охватывающая Балтийское и Северное моря одновременно. В середине 1990-х организации BSH и SHMI начали разработку совместной численной модели HIROMB, которая вначале обеспечивала 24-часовой, а позже – 48-часовой прогноз ледовой обстановки. К 1999 году горизонтальное разрешение модели достигло 1 морской мили, а к проекту присоединились Дания, Финляндия и Польша [15].

В 2017–2021 годах в России (ААНИИ) также была выполнена разработка и проведена серия производственных испытаний численной модели дрейфа и эволюции льда, основанной на Принстонской океанической модели [16]. Такая модель с шагом сетки 10 км применялась для получения прогноза динамики льдов в Белом море. По результатам испытаний на данных 3 сезонов (2019–2021), средние значения оправдываемости для заблаговременности +72 часа превысили 80–85 %, при этом наилучшая оправдываемость 89,2 % оказалась для однолетних тонких льдов. Для прогноза сплоченности льда, примерно 80% всех ошибок составила ошибка в +/- 1 балл.

Однако наиболее практически значимыми являются региональные численные модели, разработанные специально для получения ледовых прогнозов. Так, в середине 2010-х в Швеции вместо HIROMB стала применяться модель NEMO-Nordic [17], которая использовала наиболее продвинутой и точную на тот момент модель морского льда LIM3. Модель NEMO-Nordic 1.0 использовала 56 слоев, а ее горизонтальное разрешение для ледового прогноза составляло от 1 до 2 морских миль. В дальнейшем, для прогнозирования была внедрена модель NEMO-Nordic 2.0, которая опиралась на модель морского льда SI3 [18]. Как и другие подобные модели, SI3 описывает термодинамику льда, его движение, а также процессы торошения и наслонения льда.

В Канаде с середины 2010-х используется модель RIPS (Regional Ice Prediction System) [19], осуществляющая 48-часовой прогноз, и имеющая разрешение 3-8 км. Сетка модели RIPS охватывает покрытые льдом воды вокруг Канады – Арктику и Северную Атлантику.

С 2013 года для регионального прогнозирования эволюции ледового покрова морей вдоль Северного морского пути ААНИИ использует региональные модели с разрешением 25 и 12,5 км.

В настоящее время, прогнозы при помощи этих моделей составляются один раз в трое суток по следующим морям: Карскому, Лаптевых, Восточно-Сибирскому и Чукотскому. Заблаговременность

составляет +72 часа с детализацией 24 часа. [20]. Оправдываемость прогнозов этих моделей составляет 91–97% в зависимости от активности или стабильности ледового покрова [21].

С 2020 года в ААНИИ ведется разработка новой численной модели состояния Северного ледовитого океана и его ледового покрова [20]. Новая модель должна дополнить более раннюю совместную модель циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана (AARI-IOCM), которая имела пространственное разрешение 7,5 морских миль, то есть 13,8 км [22]. В новой модели локальные сетки для арктических морей имеют разрешение 2,5 морских миль так, чтобы каждый третий узел локальной сетки совпадал с узлом сетки модели AARI-IOCM для всего Северного Ледовитого океана.

Наличие численных средств краткосрочного прогноза ледовой обстановки подтверждает актуальность разработки пространственно-временной модели для оптимизации маршрута судна с учетом прогнозного положения участков льда различной сплоченности.

Графовая модель оптимизации маршрута в пространстве-времени

Пусть состояние акватории с динамическими ограничениями в виде ледовых полей и айсбергов описывается: функцией пространственно-временной координаты (1) для этих динамических ограничений, функцией пространственной координаты (2) для статических ограничений в виде берегов, островов и зон мелководья, функциями неоднородности ледового покрова (3) и (4), задающими толщину и сплоченность льда соответственно.

$$f_1(x, y, t) = [0, 1] \quad (1)$$

$$f_2(x, y) = [0, 1] \quad (2)$$

$$H(x, y, t) = [h_1, h_2, \dots, h_n] \quad (3)$$

$$C(x, y, t) = [c_1, c_2, \dots, c_m] \quad (4)$$

Здесь, булева функция f_1 принимает ложное значение, если точка с географическими координатами (x, y) в момент времени t находится в зоне ограничения, а истинное – в противном случае. Аналогичным образом определяется значение функции f_2 для пространственной координаты (x, y) .

Так каждой точке рассматриваемой области в пространстве-времени можно поставить в соответствие булеву функцию B , обобщенно описывающую доступность акватории для данного типа судна:

$$B(x, y, t, C, H) = f_1 \cap f_2 \cap H \leq h_{thr} \cap C \leq c_{thr} \quad (5)$$

Здесь, h_{thr} и c_{thr} задают максимально допустимые значения толщины и сплоченности льда, которые определяются характеристиками и типом ледового класса судна.

Модель маневренности судна во льдах

Существует ряд моделей для описания способности судна маневрировать в различных ледовых условиях. В данной работе используется модель [23], в которой скорость судна $v(H, C)$ является функцией толщины $H(x, y, t)$ и

сплоченности $C(x, y, t)$ льда, а также, зависит от характеристик судна:

$$v(H, C): \begin{cases} \frac{v_{ow}}{(C_1 - C_0) \cdot v_{ow} + (C - C_0) \cdot v(H)} & C \leq C_0 \\ \frac{v(H)}{(C_1 - C_0)} & C_0 < C < C_1 \\ v(H) & C \geq C_1 \end{cases} \quad (6)$$

Здесь, v_{ow} – скорость судна на открытой воде, константы C_0 и C_1 – граничные значения сплоченности льда, при которых скорость судна предполагается равной скорости на открытой воде и скорости в сплошном льду, соответственно, а неявно заданная функция $v(H)$ может быть определена из (7–12):

$$T_{net}(v) = R(v, H) \quad (7)$$

$$R(v, H) = K_1(H) + v \cdot K_2(H) \quad (8)$$

$$T_{net}(v) = \left(1 - \frac{v}{3 \cdot v_{ow}} - \frac{2}{3} \left(\frac{v}{v_{ow}}\right)^2\right) \cdot T_{pull} \quad (9)$$

$$T_{pull} = K_e(P_s D_p)^{\frac{2}{3}} \quad (10)$$

$$K_1(h) = \alpha_1 \left(2 \frac{d}{B} + 1\right)^{-1} BL_{par} h + (1 + 0.021\phi) \cdot ((\alpha_2 B + \alpha_3 L_{bow})h^2 + \alpha_4 BL_{bow} h) \quad (11)$$

$$K_2(h) = (1 + 0.063\phi)(\beta_1 h^{1.5} + \beta_2 B h) + \beta_3 h \left(1 + 1.2 \frac{d}{B}\right) \frac{B^2}{\sqrt{L}} \quad (12)$$

Здесь T_{net} – тяга судна, R – общее сопротивление судна, вызванное ледовыми условиями, K_e – коэффициент тягового усиления, P_s – тяговая мощность, D_p – диаметр винта, d – осадка судна, B – ширина судна, L_{par} – длина цилиндрической вставки, L_{bow} – длина носовой части, L – длина судна, ϕ – угол носовой части. Более подробное описание модели, а также, значения констант $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ может быть найдено, например, в работах [23, 24].

Постановка задачи оптимизации

Пусть для некоторой акватории, в которой предполагается непрерывное движение судна, задан ориентированный граф $G(X, U)$, где X – множество вершин, определяемых географическими координатами (x, y) и моментом времени t , в который вершина $P(x, y, t)$ окажется посещенной, а U множество дуг графа, соединяющих определенные вершины.

Целью пространственно-временной оптимизации маршрута на графе $G(X, U)$ является поиск ациклического маршрута $T_{SF} = \{S, \dots, F\}$ от узла $S \in X$ в узел $F \in X$, минимизирующего значение целевой функции f_3 (13) при соблюдении истинности значения булевой функции (5) всего геометрического места точек ломаной T_{SF} в пространстве-времени.

$$f_3(T) = \sum_{i=0}^{|T|-1} \frac{l(u_i)}{v(u_i)} \quad (13)$$

$$T_{SF}: f_3(T_{SF}) = \min f_3(T) \quad (14)$$

Здесь функция $l(u)$ характеризует протяженность дуги $u \in U$, а функция $v(u)$ – скорость прохождения судном вдоль дуги $u \in U$.

Алгоритм оптимизации

Известно, что волновой алгоритм поиска кратчайшего пути на графе оптимизирует количество входящих в маршрут вершин (ребер) и ничего не знает об их весовых функциях [14]. Другими словами, традиционный волновой алгоритм не способен учесть пространственную неоднородность ледовых условий. Однако, алгоритм способен находить оптимальные пути в лабиринтах однородной среды с учетом динамически изменяющихся внешних условий, имея линейную сложность $O(n)$.

В настоящей работе предлагается применять волновой алгоритм для оптимизации маршрутов, определив сам граф так, чтобы пространственная неоднородность ледовых условий описывалась конфигурацией (геометрией) этого графа. Другими словами, предлагается контролировать величину дуги $l(u(P_i, P_j))$, $u \in U$ между каждой парой смежных вершин $P_i \in X$ и $P_j \in X$ таким образом, чтобы отношение (15) оставалось постоянным для всех дуг $u \in U$ графа G .

$$\Delta t(u(P_i, P_j)) = \frac{l(u(P_i, P_j))}{v(u(P_i, P_j))} = \text{const} \quad (15)$$

Здесь $v(u(P_i, P_j))$ – скорость прохождения судном вдоль дуги $u(P_i, P_j)$, которая определяется выражением (6) и зависит от известной сплоченности и толщины льда вдоль дуги $u(P_i, P_j)$ в момент времени t .

Следовательно, поскольку время прохождения судном вдоль каждой дуги остается постоянной величиной, функция (13) может быть упрощена до (16):

$$f_3(T) = (|T| - 1) \cdot \Delta t \quad (16)$$

Здесь $|T|$ – количество дуг в маршруте T , а Δt – время прохождения судном вдоль одной дуги.

Геометрия пространственно-временного графа

Построение пространственно-временного графа $G(X, U)$ заключается в последовательном пополнении множеств вершин X_{t_i} и дуг U_{t_i} переходя от одного временного уровня t_i к другому. Формирование графа начинается с узла $S \in X$ в момент времени t_0 и заканчивается на временном шаге t_n , для которого выражение (17) истинно. Множества вершин X и дуг U графа G представляют собой объединения множеств вершин X_{t_i} и дуг U_{t_i} полученных для каждого уровня времени (18).

$$(F \in X_{t_n}) \cup (X_{t_n} = \emptyset) = \text{true} \quad (17)$$

$$X = \bigcup_{i=1}^n X_{t_i}, \quad U = \bigcup_{i=1}^n U_{t_i} \quad (18)$$

Рассмотрим более подробно задание вершин и дуг, расположенных на соседних уровнях. Введем понятие ячейки графа G (Определение 1) – элементарного подграфа с уникальным

расположением вершин и ребер, определяемым ледовой обстановкой в окрестности опорной вершины P_0 . На рис. 2 показан схематический пример возможной геометрии ячейки графа G , где α – постоянный угол между проекциями ребер на плоскость $t = t_i$. В этом примере дуга $u(P_0, P_3)$ имеет наименьшую длину, а дуга $u(P_0, P_6)$ – наибольшую.

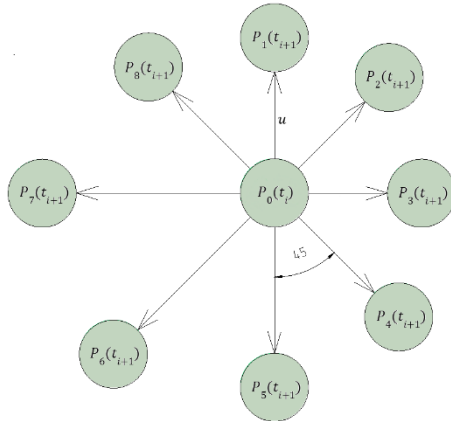


Рис. 2. Схематический пример возможной конфигурации ячейки графа G

Определение 1. Ячейкой пространственно-временного графа G с постоянными уровнями времени будем называть такое дерево G' с корнем в опорной вершине $P_0 = P(x_0, y_0, t_0)$, что все его дуги инцидентны опорной вершине, а угол α между проекциями этих дуг на плоскость $t = t_0$ постоянен.

Задача построения отдельной ячейки графа сводится к определению вершин нового временного уровня P_j : $j = 1, \dots, k$, отложенных от опорной вершины P_0 на расстояние $l(u) = v(u) \cdot \Delta t$. Здесь:

k – количество вершин нового временного уровня для ячейки, $k = 360/\Delta \alpha$;

$u(P_0(t_i), P_j(t_{i+1}))$ – ребро, соединяющее опорную вершину ячейки $P_0(t_i)$ с вершиной нового временного уровня $P_j(t_{i+1})$, $u \in U'$;

$v(u) = v(C(u), H(u))$ – скорость прохождения судном вдоль ребра $u \in U'$.

Соединяя такие ячейки послойно, получаем пространственно-временное дерево. Однако модель дерева не может описать ситуацию попадания в одну и ту же точку в один и тот же момент времени разными маршрутами. Поэтому возникает задача соединения ячеек не только через корневую вершину. Наличие такого свойства открывает возможность для построения Парето-фронта в двухкритериальной задаче оптимизации, где один из критериев – оптимальность по времени на маршруте.

Двухкритериальная оптимизация на пространственно-временном графе

Важным обстоятельством является быстрый рост числа вершин графа при последовательном соединении ячеек, в особенности – при небольшом значении угла α .

Чтобы избежать чрезмерного усложнения графа, а также чтобы обеспечить граф свойством попадания в одну и ту же точку в один и тот же момент времени разными путями, предлагается формировать граф не

из исходных, а из модифицированных ячеек. Предлагаемая модификация состоит в следующем:

Определять и исключать некоторое подмножество вершин $X_{red t_i}$ (подмножество «redundant»), которые не приводят к росту изохроны.

Переходя от модели дерева к более общей модели ориентированного ациклического графа (DAG), дополнять граф вершинами, лежащими в соответствующей плоскости $t = t_i$, и инцидентными корням двух соседних ячеек. Множество этих вершин обозначим $X_{add t_i}$ (множество «additional»).

Дополнительно исключать вершины, попавшие в R -окрестность вершин из $X_{add t_i}$.

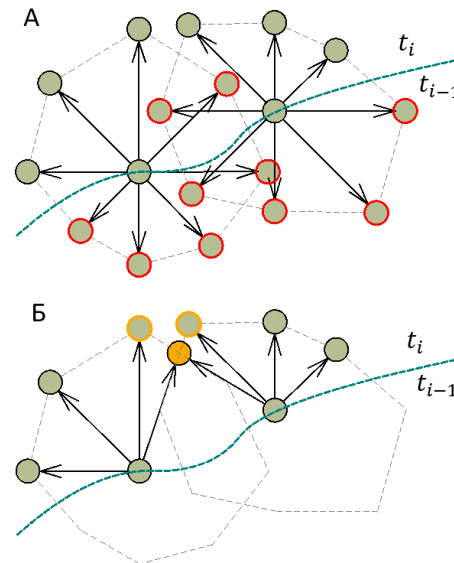


Рис. 3. Схематический пример исключения / пополнения множества вершин X_{t_i} для пары ячеек уровня t_i : а) вершины, не ведущие к росту изохроны (зеленые вершины с красным контуром), б) вершина, являющаяся пересечением полигонов двух ячеек в плоскости $t = t_i$ (желтая вершина) и вершины, попавшие в R -окрестность вершин из $X_{add t_i}$ (зеленые вершины с желтым контуром)

Таким образом, множество вершин X_{t_i} на временном шаге t_i пространственно-временного графа G определяется уравнением (19), а множество дуг, U_{t_i} – инцидентными им дугами предыдущего временного уровня t_{i-1} .

$$X_{t_i} = \left(\sum_{j=0}^{|X_{t_{i-1}}|} X'_{j t_i} \right) \setminus \left(X'_{red t_i} - X'_{near t_i}(R) \right) + X_{add t_i} \setminus X_{red t_i} \quad (19)$$

Здесь $X'_{near t_i}(R)$ – дополнительно исключаемые вершины, попавшие в R -окрестность точек сращивания ветвей ячеек, что способствует упрощению графа.

Пример применения пространственно-временной модели для динамической ледовой обстановки моря Баффина

Продemonстрируем оптимизацию маршрута судна при помощи предложенной дискретной пространственно-временной модели. Для этого используем ретроспективные спутниковые

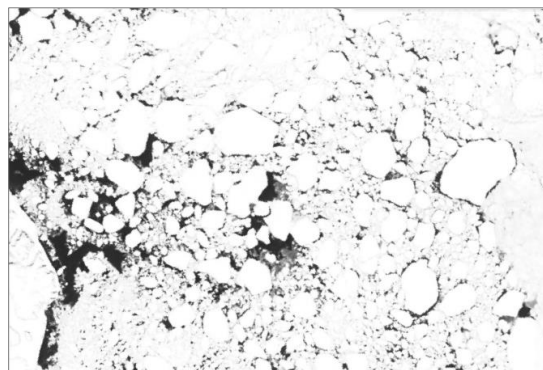
изображения ледовой обстановки южной части моря Баффина за май 2025 года (Рис. 4). Применение последовательных спутниковых снимков является обычным при верификации, например прогноза дрейфа ледяного покрова [16].

Для расчетного примера были использованы как снимки, приведенные на рисунке 4 а) и б), так и сгенерированные с шагом в 3 часа предположительные промежуточные состояния ледовой обстановки между этими снимками. Толщина льда (3) для любой концентрации (4) $C(x, y, t) > 0$ была принята $h = 0,7$ метра

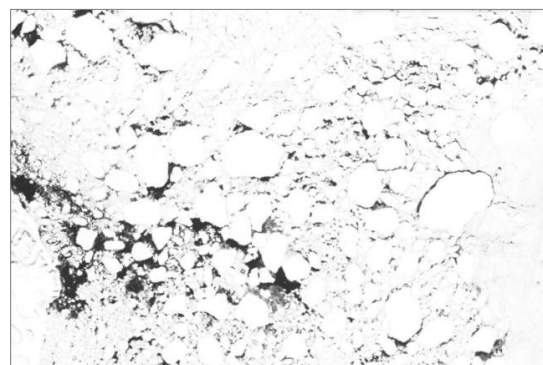
На рисунке 5 представлено синтетическое изображение, составленное по линиям изохрон из части исходного снимка от 11 мая 2025 года (Рис. 4 а) и участков промежуточных состояний между ним и снимком от 12 мая (Рис. 4 б). Красным цветом дана проекция одного из равно-оптимальных маршрутов между точками S и F. Отметим, что точка F в пространственно-временной модели находится на плоскости промежуточного состояния +12 часов.

На рисунке показано множество равно-оптимальных маршрутов, каждый из которых является проекцией соответствующего пути на пространственно-временном графе. Видно, что в этом множестве имеются альтернативные маршруты обхода ледовых препятствий. Оптимизация проводилась для судна ледового класса PC6 (IACS), имеющего осадку 5,3 м, длину 107,6 м, ширину 17,6 м, и развивающего скорость на чистой воде 7,8 узла.

Нужно отметить, что для судов низкого и среднего ледового классов, как PC6, оптимизация маршрута дает на расчетных примерах существенно больший экономический эффект, чем для судов высоких ледовых классов [25].



а)



б)

Рис. 4. Отличающаяся на одни сутки ледовая обстановка Баффина: изображения спутника Sentinel-3 от 11 (а) и 12 (б) мая 2025 года.

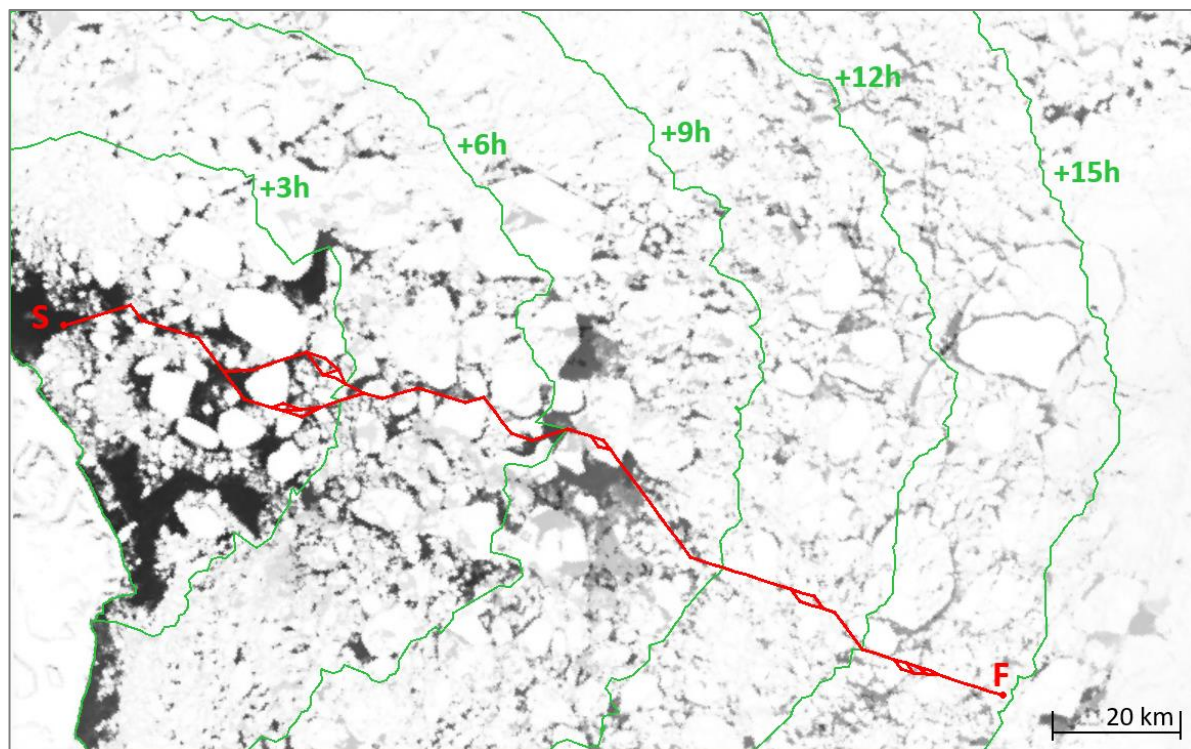


Рис. 5. Проекция равно-оптимальных маршрутов, построенных между точкой старта (S) на плоскости спутникового изображения, и точкой финиша (F) на плоскости промежуточного состояния +12 часов.

Заключение

Применение графовых методов для решения задач оптимизации маршрута судна в неоднородной динамической ледовой обстановке требует выбора модели дискретизации переходов между точками в пространстве-времени.

Как и в других методах, основанных на концепции изолиний, важным обстоятельством для сокращения вычислительной сложности является отсечение лишних направлений распространения ветвей графа.

Предложенная модель дискретизации, основанная на равенстве временных отсчетов, позволяет использовать вычислительно малозатратные алгоритмы обхода графа, и существенно повышает практическую применимость метода на обычных вычислительных машинах.

Предложенный метод сращивания ветвей графа на каждом временном уровне позволяет получать альтернативные равно-оптимальные маршруты, и открывает возможности для многокритериальной оптимизации на графе и итогового построения Парето-фронта.

Литература

1. Mishra P., Alok S., Rajak D., Beg J. M., Bahuguna I. M., Talati I.. Investigating optimum ship route in the Antarctic in presence of sea ice and wind resistances — A case study between Bharati and Maitri. *Polar Science*. 2021. № 30. 100696.
2. Онлайн-платформа спутниковых изображений Copernicus Browser, [Электронный ресурс] – режим доступа <https://browser.dataspace.copernicus.eu>. Дата обращения: 01.10.2025
3. Montewka, J., Goerlandt, F., Kujala, P., Lensu, M. Probabilistic models for the prediction of a ship performance in dynamic ice. *Cold Regions Science and Technology*. 2015. № 112. P. 14-28.
4. Войтунская А. Я., Звягин П. Н. Маршрутизация судна в дрейфующем льду. *Морские Интеллектуальные Технологии*. 2018. № 2 (40) Т. 1.
5. Chen Y., Zhang C., Guo Y., Wang Y., Lang X., Zhang M., Mao W. State-of-the-art optimization algorithms in weather routing — ship decision support systems: challenge, taxonomy, and review. *Ocean Engineering*. 2025. № 331, 121198.
6. James R. W. Application of wave forecasts to marine navigation. New York University. 1957.
7. Hagiwara H. Weather routing of (sail-assisted) motor vessels. Ph. D. thesis. Delft University. 1989.
8. Chen Y., Tian W., Mao W. Strategies to improve the isochrone algorithm for ship voyage optimization. *Ships and Offshore Structures*. 2024. № 19(12), P. 1 – 13.
9. Topaj A., Tarovik. O, Bakharev A., Kondratenko, A. Optimal ice routing of a ship with icebreaker assistance. *Applied Ocean Research*. 2019. № 86, p. 177 – 187.
10. Платформа предоставления информации в реальном времени о движении судов MarineTraffic, [Электронный ресурс] – режим доступа <https://www.marinetraffic.com> Дата обращения: 03.10.2025
11. Hart, P. E., Nilsson, N.J., Raphael, B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*. 1968. № 4 (2): 100–7.
12. Стенц. Э. Оптимальное и эффективное планирование пути для частично известных сред. *Материалы Международной конференции по робототехнике и автоматизации*, 1994. 3310—3317.
13. Dijkstra, E.W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numer. Math.*, 1959. № 1(1). P. 269 – 271.
14. Lee, C. Y. An Algorithm for Path Connections and Its Applications. *IRE Transactions on Electronic Computers*. 1961. № EC-10, 3, p. 346–365.
15. Funkquist, L., & Kleine, E. (2007). An introduction to HIROMB, an operational baroclinic model for the Baltic Sea. SMHI Reports Oceanography, No. 37. Norrköping, Sweden: Swedish Meteorological and Hydrological Institute.
16. Клячкин, С.В., Гузенко Р.Б., Май Р.И., Саперштейн Е.Б., Сергеева И.А., Ярославцева, С.И., Драбкин В.В. Методика прогноза дрейфа льдов в Белом море на период до 5 суток на основе усовершенствованной численной динамико-термодинамической модели // *Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов*. 2023. № 50. С. 123-145.
17. Pemberton, P., Löptien, U., Hordoir, R., Höglund, A., Schimanke, S., Axell, L., & Haapala, J. (2017). Sea-ice evaluation of NEMO-Nordic 1.0: A NEMO-LIM3.6-based ocean-sea-ice model setup for the North Sea and Baltic Sea. *Geoscientific Model Development*, 10(8), 3105–3123. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3105-2017>
18. Kärnä, T., Ljungemyr, P., Falahat, S., Ringgaard, I., Axell, L., Korabel, V., Murawski, J., Maljutenko, I., Lindenthal, A., Jandt-Scheelke, S., Verjovkina, S., Lorkowski, I., Lagema, P., She, J., Tuomi, L., Nord, A., and Huess, V. (2021). Nemo-Nordic 2.0: operational marine forecast model for the Baltic Sea. *Geoscientific Model Development*, 14(9), 5731–5749. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-5731-2021>
19. Lemieux, J.-F., Beaudoin, C., Dupont, F., Roy, F., Smith, G. C., et al. (2016). The Regional Ice Prediction System (RIPS): verification of forecast sea ice concentration. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(689), 1389–1402.
20. Клячкин С.В., Кулаков М.Ю., Фильчук К.В., Алексеев В.В., Дымов В.И., Коробов П.В. Интегрированная интерактивная система численного прогнозирования элементов ледово-гидрологического режима Северного Ледовитого океана // *Российская Арктика*. 2024. Т. 6, № 4 (27). С. 19–36.
21. Клячкин, С. В., Сергеева, И. А. Достоверность краткосрочных и долгосрочных ледовых прогнозов для обеспечения мореплавания и других видов хозяйственной деятельности на СМП в 2023 году // *Российские полярные исследования*. 2024. № 1 (55). С. 28–29.
22. Кулаков М.Ю., Макштас А.П., Шутилин С.В. AARI-IOCM – совместная модель циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2012. Том 92. № 2. С. 6–18.
23. Kotovirta, V., Jalonen R., Axell L., Riska, K., Berglund R. A system for route optimization in ice-covered waters. *Cold Region Science in Technologies*. 2009. № 55, 52 – 62.

24. Zvyagina T., Zvyagin P., Finding Risk-Expenses Pareto-Optimal Routes in Ice-Covered Waters. Marine Science and Engineering. 2022. № 10, 862.
25. Звягина Т.Л. Применение пространственно-временной модели оптимизации маршрута во льдах для различных типов судов // Труды IV отраслевой научно-практической конференции «Новые технологии в судостроении» НТС-2025. Санкт-Петербург, 2025.

References

1. Mishra P., Alok S., Rajak D., Beg J. M., Bahuguna I. M., Talati I.. Investigating optimum ship route in the Antarctic in presence of sea ice and wind resistances — A case study between Bharati and Maitri. Polar Science. 2021. № 30. 100696.
2. Copernicus Browser — a gateway of the Copernicus Programme. Available at: <https://browser.dataspace.copernicus.eu>. Accessed: 01.10.2025
3. Montewka, J., Goerlandt, F., Kujala, P., Lensu, M. Probabilistic models for the prediction of a ship performance in dynamic ice. Cold Regions Science and Technology. 2015. № 112. P. 14-28.
4. Voitkounskaia A. Ja., Zvyagin P. N. A routing of a vessel in drifting ice. Marine Intellectual Technologies. 2018. № 2 (40) Vol. 1. (in Russian)
5. Chen Y., Zhang C., Guo Y., Wang Y., Lang X., Zhang M., Mao W. State-of-the-art optimization algorithms in weather routing — ship decision support systems: challenge, taxonomy, and review. Ocean Engineering. 2025. № 331, 121198.
6. James R. W. Application of wave forecasts to marine navigation. New York University. 1957.
7. Hagiwara H. Weather routing of (sail-assisted) motor vessels. Ph. D. thesis. Delft University. 1989.
8. Chen Y., Tian W., Mao W. Strategies to improve the isochrone algorithm for ship voyage optimization. Ships and Offshore Structures. 2024. № 19(12), P. 1 – 13.
9. Topaj A., Tarovik. O, Bakharev A., Kondratenko, A. Optimal ice routing of a ship with icebreaker assistance. Applied Ocean Research. 2019. № 86, p. 177 – 187.
10. MarineTraffic — a maritime analytics provider. Available at: <https://www.marinetraffic.com> Accessed: 03.10.2025
11. Hart, P. E., Nilsson, N.J., Raphael, B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. 1968. № 4 (2): 100–7.
12. Stentz A. Optimal and efficient path planning for partially known environments. Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation. 1994. P. 3310-3317. (In Russian)
13. Dijkstra, E.W. A note on two problems in connexion with graphs. Numer. Math., 1959. № 1(1). P. 269 – 271.
14. Lee, C. Y. An Algorithm for Path Connections and Its Applications. IRE Transactions on Electronic Computers. 1961. № EC-10, 3, p. 346–365.
15. Funkquist, L., & Kleine, E. (2007). An introduction to HIROMB, an operational baroclinic model for the Baltic Sea. SMHI Reports Oceanography, No. 37. Norrköping, Sweden: Swedish Meteorological and Hydrological Institute.
16. Klyachkin, S.V., Guzenko, R.B., May, R.I., Sapershtein, E.B., Sergeeva, I.A., Yaroslavl'tseva, S.I., Drabkin, V.V. Method for forecasting ice drift in the White Sea for a period of up to 5 days based on an improved numerical dynamic-thermodynamic model // Results of testing new and improved technologies, models and methods of hydrometeorological forecasts. 2023. No. 50. P. 123-145. (in Russian)
17. Pemberton, P., Löptien, U., Hordoir, R., Höglund, A., Schimanke, S., Axell, L., & Haapala, J. (2017). Sea-ice evaluation of NEMO-Nordic 1.0: A NEMO-LIM3.6-based ocean-sea-ice model setup for the North Sea and Baltic Sea. Geoscientific Model Development, 10(8), 3105–3123. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3105-2017>
18. Kärnä, T., Ljungemyr, P., Falahat, S., Ringgaard, I., Axell, L., Korabel, V., Murawski, J., Maljutenko, I., Lindenthal, A., Jandt-Scheelke, S., Verjovkina, S., Lorkowski, I., Lagemaa, P., She, J., Tuomi, L., Nord, A., and Huess, V. (2021). Nemo-Nordic 2.0: operational marine forecast model for the Baltic Sea. Geoscientific Model Development, 14(9), 5731–5749. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-5731-2021>
19. Lemieux, J.-F., Beaudoin, C., Dupont, F., Roy, F., Smith, G. C., et al. (2016). The Regional Ice Prediction System (RIPS): verification of forecast sea ice concentration. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 141(689), 1389–1402.
20. Klyachkin S.V., Kulakov M.Yu., Filchuk K.V., Alekseyev V.V., Dymov V.I., Korobov P.V. Integrated interactive system for numerical forecasting of the Arctic Ocean ice and hydrological regime elements // The Russian Arctic. 2024. Vol. 6, No. 4 (27). P. 19–36. (in Russian)
21. Klyachkin S.V., Sergeeva I.A. Reliability of short-term and long-term ice forecasts for shipping and other economic activities on the NSR in 2023 // Russian Polar Research. 2024. No. 1 (55). P. 28–29. (in Russian)
22. Kulakov M.Yu., Makshtas A.P., Shutilin S.V. AARI–IOCM – sovместnaya model tsirkulyatsii vod i l'dov Severnogo Ledovitogo okeana [AARI–IOCM – coupled iceocean circulation model for the Arctic Ocean]. Problemy Arktiki i Antarkтики [Arctic and Antarctic Research], 2012a, vol. 92, no. 2, pp. 6-18 (In Russian).
23. Kotovirta, V., Jalonen R., Axell L., Riska, K., Berglund R. A system for route optimization in ice-covered waters. Cold Region Science in Technologies. 2009. № 55, p. 52 – 62.
24. Zvyagina T., Zvyagin P., Finding Risk-Expenses Pareto-Optimal Routes in Ice-Covered Waters. Marine Science and Engineering. 2022. Volume 10, 862.
25. Zvyagina, T.L. (2025). Application of a space-time ice route optimization model for various ship types. Proceedings of the IV Industry Scientific and Practical Conference "New Technologies in Shipbuilding" (NTS-2025). Saint Petersburg.

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 О Б АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Звягина Татьяна Леонидовна, аспирант высшей школы Прикладной математики и вычислительной физики Физико-механического института, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 190121, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: tlzvyagina@mail.ru

Tatiana L. Zvyagina, PhD student of the Department of Applied Mathematics and Computational Physics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Politehnicheskaya, 29, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: tlzvyagina@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 16.11.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 05.02.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 10.02.2026.

Научная статья

УДК 532.582.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.032>

Полуэмпирический метод расчета поля скорости вблизи тела вращения

Кадомцева А.Б.¹ kgm@smtu.ru, Зо Хтет Аунг¹ kgm@smtu.ru, Яковлев А.Ю.¹ kgm@smtu.ru¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет.

Аннотация. Целью работы является разработка полуэмпирического метода расчета поля скорости, создаваемого при продольном движении тела вращения. Полуэмпирический метод основан на расчете потенциального обтекания тела вращения с помощью метода граничных интегральных уравнений и моделировании пограничного слоя интегральным методом. Распределение скорости в пограничном слое вычисляется по формуле Прандтля на основе заданного распределения касательных напряжений и длины пути смещения. Полученное решение в пограничном слое срывается с потенциальным решением, полученным методом граничных интегральных уравнений с помощью метода сращиваемых асимптотических разложений. Достоверность получаемых результатов подтверждена сопоставлением с известными экспериментальными данными для дирижабля ZS2G-1. Проведены CFD расчеты поля скорости вблизи поверхности модели модифицированного тела Zhiyuan-1. Результаты расчетов сопоставлены с решением с помощью разработанного метода при различных числах Рейнольдса. Показано хорошее согласование результатов этих расчетов между собой. Проведены расчеты поля скорости вблизи поверхности тела вращения в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Продемонстрирована тенденция к росту толщины пограничного слоя и торможению потока в пограничном слое с уменьшением числа Рейнольдса.

Ключевые слова: тело вращения, поле скорости, расчет, полуэмпирический метод, RANS метод, длина пути смещения, метод сращиваемых асимптотических разложений

Для цитирования: Кадомцева А.Б., Зо Хтет Аунг, Яковлев А.Ю., Полуэмпирический метод расчета поля скорости вблизи тела вращения. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 310—319. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.032.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.032>

A semi-empirical method for calculating the velocity field near a body of revolution

Alena B. Kadomtseva¹ kgm@smtu.ru, Zo Htet Aung¹ kgm@smtu.ru, Aleksey Yu. Yakovlev¹ kgm@smtu.ru¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The aim of the work is to develop a semi-empirical method for calculating the velocity field created by the longitudinal motion of a body of rotation. The semi-empirical method is based on calculating the potential flow around a body of rotation using the method of boundary integral equations and modeling the boundary layer using the integral method. The velocity distribution in the boundary layer is calculated using the Prandtl formula based on a given distribution of tangential stresses and the length of the mixing path. The obtained solution in the boundary layer is spliced with a potential solution obtained by the method of boundary integral equations using the method of spliced asymptotic expansions. The reliability of the obtained results is confirmed by comparison with the known experimental data for the ZS2G-1 airship. CFD calculations of the velocity field near the surface of the Zhiyuan-1 modified model have been performed. The calculation results are compared with the solution using the developed method for different Reynolds numbers. A good agreement between the results of these calculations is shown. Calculations of the velocity field near the surface of the body of rotation in a wide range of Reynolds numbers are carried out. The tendency towards an increase in the thickness of the boundary layer and a deceleration of the flow in the boundary layer with a decrease in the Reynolds number is demonstrated.

Keywords: body of revolution, velocity field, calculation, semi-empirical method, RANS method, mixing path length, method of spliced asymptotic expansions

For citation: Alena B. Kadomtseva, Zo Htet Aung, Aleksey Yu. Yakovlev, A semi-empirical method for calculating the velocity field near a body of revolution. Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 310—319. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.032.

Введение

Винто-рулевые колонки (ВРК) в отличие от традиционных гребных винтов включают в себя гондолу и стойку габариты которых сопоставимы или превосходят габариты гребного винта (ГВ) установленного на ВРК. Взаимодействие гребного винта с корпусом ВРК происходит аналогично его взаимодействию с корпусом судна: с одной стороны работа ГВ приводит к перераспределению давлений

на поверхности корпуса ВРК в результате чего возникает сила засасывания. С другой стороны в случае работы ГВ за корпусом ВРК (так называемый толкающий вариант движителя) ГВ работает в неравномерном поле скорости, формирующимся в следе за гондолой и стойкой ВРК. Для учета влияния поля скорости в диске ГВ на его характеристики вводится так называемый осредненный по диску движителя коэффициент номинального попутного потока ψ [1], который часто называют просто

«коэффициент попутного потока». Коэффициент ψ определяют интегрированием осевой скорости v по площади диска ГВ.

Коэффициент попутного потока за корпусом ВРК может определяться экспериментальным путем в ходе модельных испытаний. В этих испытаниях обычно обеспечивают моделирование по числу Рейнольдса за счет выхода на режим автомодельности по числу оборотов гребного винта. Традиционно для достижения автомодельности считается достаточным выйти на 25 – 30 оборотов модели ГВ в секунду. Для модели ГВ такой режим работы обеспечивает большие скорости натекания потока на лопасти и как следствие большие числа Рейнольдса. Однако, на том же режиме работы движителя, скорость потока, набегающего на корпус ВРК, оказывается существенно меньше и режим автомодельности не обеспечивается. В результате, при испытаниях моделей ВРК может иметь место заметный масштабный эффект. В частности он может выражаться в несовпадении модельных и натурных величин коэффициента попутного потока.

Для учета масштабного эффекта по коэффициенту попутного потока можно использовать численные методы. Для инженерной практики желательно иметь быстрые и эффективные методы учета масштабного эффекта. Поскольку коэффициент попутного потока определяется распределением скорости в диске ГВ [1], для учета масштабного эффекта необходимо разработать быстрый и эффективный метод расчета поля скорости за гондолой и стойкой ВРК.

В данной работе решается одна из этих задач: создание полуэмпирического метода расчета поля скорости за телом вращения (гондолой ВРК).

1. Полуэмпирический метод расчета

Ранее был разработан полуэмпирический метод учета масштабного эффекта при оценке сопротивления осесимметричных тел движущихся без угла атаки [2]. Однако, этот метод не позволяет проводить непосредственный расчет скорости в окружающей тело жидкости. Для расчета поля скорости разрабатывается специальный метод, представленный в данной работе. Этот новый метод представляет собой развитие метода [2] и использует получаемые с помощью метода [2] расчетные характеристики пограничного слоя.

1.1. Метод расчета пограничного слоя на теле вращения

Рассматриваемый полуэмпирический метод [2] относится к так называемым интегральным методам расчета пограничного слоя. Интегральные методы представляют собой простой, быстрый и достаточно точный способ моделирования пограничного слоя. Интегральными эти методы называются потому, что в них оперируют величинами, полученными в результате интегрирования скоростей в поперечном сечении пограничного слоя. Традиционно используются следующие характеристики пограничного слоя: δ – толщина пограничного слоя, δ^* – толщина вытеснения, δ^{**} – толщина потери импульса, δ^{***} – толщина потери энергии [3].

В отечественной практике Л.Г. Лойцянский был развит метод перехода от ламинарного ПС на теле вращения к расчету плоского ламинарного ПС [3].

Этот подход был применен в [2] для расчета турбулентного пограничного слоя. Основные положения этого метода представлены ниже.

Для осесимметричного пограничного слоя, помимо указанных выше величин, вводится понятие площади потери импульса S^{**} :

$$S^{**} = 2\pi \int_R^{R+\delta} \frac{u}{V} \left(1 - \frac{u}{V}\right) r dr \quad (1)$$

Где R – радиус тела вращения, u – продольная компонента скорости в пограничном слое, r – радиальная координата (в цилиндрической системе координат, связанной с телом вращения), δ – толщина пограничного слоя, V – скорость внешнего потенциального течения.

Площадь потери импульса S^{**} связана с толщиной потери импульса δ^{**} следующим соотношением

$$\delta^{**} \approx \frac{S^{**}}{2\pi R} \quad (2)$$

За толщину пограничного слоя δ , входящую в (1), принимают расстояние от поверхности тела, на котором скорость потока в пограничном слое u практически совпадает со скоростью внешнего потенциального течения V .

Для расчета сопротивления тел вращения используется формула, аналогичная формуле Сквайра-Юнга, применяемой для плоских профилей [2]:

$$C_D = 2 \cdot \bar{V}_1^{3,5} \cdot \frac{S_1^{**}}{\Omega} \quad (3)$$

Где Ω – характерная поверхность тела, индексом 1 обозначены характеристики в хвостовой оконечности тела вращения, чертой сверху здесь и далее обозначается обезразмеривание по скорости набегающего потока.

При расчете пограничного слоя на теле вращения, его характеристики, а так же радиус тела R и скорость внешнего потенциального потока V рассматриваются как функции координаты X , отсчитываемой вдоль пограничного слоя. Координата Y направлена поперек пограничного слоя. Скорость в пограничном слое u является функцией этих переменных: $u=u(X,Y)$.

Для перехода к решению плоской задачи, в соответствии с методом Лойцянского [3], выполняется следующая замена переменных:

$$x = \int_0^X R^{1+m} dX \quad (4)$$

$$y = R \cdot Y$$

Где x и y – координаты в плоском пограничном слое, направленные вдоль и поперек пограничного слоя, аналогичные координатам X и Y в осесимметричном пограничном слое, m – параметр, зависящий от вида течения в ПС. В случае ламинарного ПС $m=1$, для турбулентного ПС принимаем величину $m=1/6$ [5].

Используя известные решения для плоского случая, были получены [2] следующие соотношения для площади потери импульса S^{**} на теле вращения, в ламинарном:

$$S_L^{**}(x) = \frac{1,34 \cdot \pi}{\sqrt{\text{Re}} \cdot |\bar{V}|^{2,67}} \cdot \sqrt{\int_0^x |\bar{V}|^{4,35} R^2 dx} \quad (5)$$

и турбулентном пограничном слое:

$$S_T^{**}(x) = \frac{0,0306 \cdot \pi}{\sqrt[3]{Re} \cdot |\bar{V}|^{3,04}} \times \left(\int_{x_i}^x |\bar{V}|^{3,545} R^{\frac{7}{6}} dx + 15,4 \cdot \sqrt[6]{Re} \cdot \bar{V}_t^{3,55} \cdot (S_{Lt}^{**})^{\frac{7}{6}} \right)^{\frac{6}{7}} \quad (6)$$

где индекс t соответствует точке ламинарно-турбулентного перехода, 0 – передней критической точке, 1 – хвостовой оконечности тела, Re – число Рейнольдса.

Число Рейнольдса вычисляется по длине тела вращения L и скорости набегающего потока V_∞ :

$$Re = \frac{V_\infty L}{\nu} \quad (7)$$

Где ν – коэффициент кинематической вязкости.

Как видно из этих выражений, для расчета пограничного слоя интегральным методом необходимо знать распределение скорости $V(x)$ во внешнем потенциальном потоке. Эта скорость может быть получена с помощью методов граничных интегральных уравнений (ВЕМ методов).

1.2. Метод ВЕМ

Для расчета скорости в потоке при потенциальном обтекании тела вращения будем использовать метод ВЕМ [4]. В рамках этого метода решение задачи ищется в виде потенциала простого слоя (слоя источников), распределенного на поверхности тела. Удовлетворяя условию непротекания на этой поверхности, сводим задачу к решению интегрального уравнения Фредгольма 2-го рода, относительно неизвестной интенсивности источников.

$$-\frac{q(P_0)}{2} + \frac{1}{4\pi} \int_S q(P) \cdot \frac{\partial}{\partial n_{P_0}} \frac{1}{R_{PP_0}} dS_P = -\left(\vec{V}_\infty, \vec{n} \right) \quad (8)$$

где P и P_0 – точки на поверхности S , R_{PP_0} – расстояние между ними, $\vec{n}$ – нормаль к поверхности S , $\vec{V}_\infty$ – скорость набегающего потока.

Отличительными особенностями используемого метода являются: представление интенсивностей источников в виде ряда Фурье по угловой координате и разбиения поверхности гондолы в продольном направлении на элементы конической формы.

После решения уравнения (8), скорости во внешнем потоке могут быть определены путем интегрирования вызванных скоростей от потенциала простого слоя на поверхности тела вращения

$$\vec{V} = \vec{V}_\infty + \frac{1}{4\pi} \int_S q \cdot \vec{\nabla} \frac{1}{\mathfrak{R}} dS \quad (9)$$

где $\vec{\mathfrak{R}}$ – вектор, направленный из точки расположения источника на поверхности тела P_0 в точку потока, в которой рассчитывается скорость.

1.3. Расчет скорости в пограничном слое

Из теории турбулентного пограничного слоя известна так называемая трехслойная модель турбулентности [5]. В рамках этой модели получены асимптотические решения для течения в различных областях пограничного слоя.

Эти решения можно использовать для моделирования распределения скорости вблизи поверхности тела, однако возникают определенные

трудности при их согласовании с внешним потенциальным потоком. Одним из способов получения единого непрерывного распределения скорости на произвольном расстоянии от обтекаемого тела является метод сращиваемых асимптотических разложений [6]. Однако, для его применения необходимо иметь так называемое внутреннее решение, которое для срачивания с внешним решением должно содержать информацию об асимптотическом поведении на внешней границе. В выражениях традиционно описывающих отдельные области в рамках трехслойной модели турбулентности [5] такая информация отсутствует. Следовательно, необходимо использовать иной способ получения распределения скорости во всем пограничном слое.

В данной работе предлагается использовать для расчета скорости в турбулентном пограничном слое так называемый интегральный метод [7]. Основой такого подхода является известная формула Прандтля, позволяющая вычислять скорость в пограничном слое и путем интегрирования распределения касательных напряжений τ поперек пограничного слоя [7]

$$u = \bar{V} - \int_y^\delta \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \frac{dy}{\ell} \quad (10)$$

Где ℓ – длина пути смешения, в соответствии с теорией Прандтля, τ – касательные напряжения, ρ – плотность жидкости.

Для скорости, обезразмеренной по скорости внешнего потенциального потока, получаем

$$\bar{u} = 1 - \int_{\tilde{y}}^1 \sqrt{\frac{C_\tau}{2}} \frac{d\tilde{y}}{\ell} \quad (11)$$

Где волной сверху обозначено обезразмеривание по толщине пограничного слоя δ , $C_\tau = \frac{2\tau}{\rho V_\infty^2}$ –

коэффициент касательных напряжений.

Длина пути смешения является эмпирическим параметром. Для нее известен ряд аналитических выражений [7], полученных из общих соображений о процессах развития турбулентности. В данной работе будем использовать классическую формулу Прандтля для длины пути смешения:

$$\tilde{\ell} = 0,14 - 0,08 \cdot (1 - \tilde{y})^2 - 0,06 \cdot (1 - \tilde{y})^4 \quad (12)$$

Эта формула, как известно, хорошо описывает зависимость длины пути смешения от расстояния до плоской протяженной стенки. Она позволяет перейти от постоянной длины пути смешения в безграничном потоке к ее нулевой величине вблизи стенки. Равенство длины пути смешения нулю вблизи стенки обусловлено влиянием вязкого подслоя. Однако в окрестности выходящей кромки осесимметричного тела площадь поверхности тела стремится к нулю и длина пути смешения не должна испытывать ее влияния. Для учета этого эффекта предлагается использовать следующую откорректированную формулу для расчета длины пути смешения в произвольной точке тела вращения

$$\tilde{\ell} = \frac{\tilde{R} + \tilde{y}}{\tilde{R} + 1} \cdot [0,14 - 0,08 \cdot (1 - \tilde{y})^2 - 0,06 \cdot (1 - \tilde{y})^4] \quad (13)$$

Предлагаемая зависимость будет совпадать с классической формулой Прандтля (12) если радиус

тела достаточно велик по сравнению с толщиной пограничного слоя. В том случае, когда радиус тела вращения стремится к нулю, длина пути смещения будет стремиться к постоянной величине, отвечающей случаю безграничного потока.

Что касается коэффициента касательных напряжений C_τ , то он задается из общих соображений о течении в пограничном слое. В соответствии с подходом Федяевского [7] будем использовать полиномиальное представление для коэффициента C_τ :

$$C_\tau = C_{\tau w} \sum_{n=0}^N b_n \tilde{y}^n \quad (14)$$

Где $C_{\tau w}$ – коэффициент касательных напряжений на поверхности обтекаемого тела.

Обычно при практических расчетах в этом выражении ограничиваются несколькими слагаемыми. Для определения коэффициентов b_n необходимо использовать граничные условия, определяющие поведение касательных напряжений на внешней границе пограничного слоя ($\tilde{y} \rightarrow \delta$) и на поверхности тела ($\tilde{y} = 0$).

К числу очевидных граничных условий для касательных напряжений относятся:

- условие отсутствия касательных напряжений во внешнем потенциальном течении:

$$C_\tau = 0, \text{ при } \tilde{y} = \delta \quad (15)$$

- условие достижения на поверхности тела заданной величины касательных напряжений $C_{\tau w}$:

$$C_\tau = C_{\tau w}, \text{ при } \tilde{y} = 0 \quad (16)$$

- Два условия, дополнительно следующие из уравнения Прандтля [7]:

$$\frac{dC_\tau}{d\tilde{y}} = R \frac{dC_p}{d\tilde{x}}, \text{ при } \tilde{y} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{d^2 C_\tau}{d\tilde{y}^2} = 0, \text{ при } \tilde{y} = 0 \quad (18)$$

где C_p – коэффициент давления на поверхности тела вращения.

Коэффициент давления определяется на основе скорости на поверхности тела вращения, определенной в потенциальном решении (9):

$$C_p = 1 - \left(\frac{V}{V_\infty} \right)^2 \quad (19)$$

Сформулированных условий (15) (16) (17) (18) достаточно для определения четырех коэффициентов b_n в выражении для касательных напряжений. Таким образом, касательные напряжения будут задаваться в виде полинома третьей степени:

$$C_\tau = (1 - 4\tilde{y}^2) \left(C_{\tau w} + R \frac{dC_p}{d\tilde{x}} \tilde{y} \right) \quad (20)$$

Скорость в пограничном слое u определяется путем численного интегрирования (11) касательных напряжений (20) с учетом выражения (13).

1.4. Получение единого решения для скорости

Опираясь на представленные выше математические модели, можно получить потенциальное решение, дающее распределение скорости во внешней области течения за пределами пограничного слоя V (9) и распределение скорости в области пограничного слоя u (11). Причем, для расчета скорости внутри пограничного слоя используются результаты расчета скорости в потенциальном потоке.

Получить единое распределение скорости без необходимости разделения потока на две области можно на основе метода сращиваемых асимптотических разложений (САР) [6]. Для его применения мы располагаем потенциальным внешним решением V , полученным расчетом по ВЕМ методу (9) и внутренним решением для пограничного слоя u (11). Оба решения являются численными, что принципиально не ограничивает возможности их сращивания по методу САР.

Для сращивания внутреннего и внешнего решений нам необходимо получить разложение внутреннего решения по внешней переменной u и внешнего решения по внутренней переменной $\tilde{y}$. Можно заметить, что внешнее ограниченное решение при его растяжении на малую величину δ переходит в функцию $V_{in}(x)$, зависящую только от координаты вдоль пограничного слоя. От $\tilde{y}$ эта функция зависеть не будет.

С другой стороны при подстановке $\tilde{y}=u/\delta$ в (11) и стремлении δ к нулю, подынтегральное выражение в (11) стремится к нулю как δ^3 . Таким образом, интеграл в выражении (11) становится бесконечно малым и величина скорости u стремится к константе u_{ext} .

Следуя методу САР, для согласования внутреннего и внешнего решений должно выполняться условие

$$u_{ext} = V_{in} \quad (21)$$

Где величина V_{in} определяется по результатам расчета внешнего потенциального течения.

Сращивание численных решений (9) и (11) выполняется следующим образом [6]:

$$v = V + u_{ext} - V_{in} \quad (22)$$

Где v представляет собой единое распределение скорости в поперечном сечении потока.

1.5. Алгоритм определения поля скорости

Алгоритм определения поля скорости построен следующим образом (рис. 1). В качестве исходных данных задается геометрия тела вращения и режим его обтекания (скорость потока и характеристики среды).

На первом шаге выполняется расчет потенциального обтекания тела вращения. В результате которого определяются: распределение коэффициента давления по поверхности тела $C_p(x)$ и распределение скорости в заданных точках потока $V(x_0, r)$.

Далее выполняется расчет пограничного слоя по методу подробно описанному в [2]. В результате расчета пограничного слоя определяются: распределение толщины вытеснения вдоль тела вращения $\delta^*(x)$ и распределение коэффициента касательных напряжений вдоль тела вращения

$C_{tw}(x)$. Так же определяются коэффициент сопротивления тела вращения C_D , положение точек ламинарно-турбулентного перехода и отрыва пограничного слоя [2].

Полученные данные позволяют приступить к расчету скорости в пограничном слое, по методу описанному выше. Подставляя значения $C_{tw}(x_0)$ и $dC_p/dx(x_0)$, вычисленные для заданного сечения потока $x=x_0$, в выражение (20) и выполняя интегрирование (11) приходим к распределению скорости $u(\tilde{R}+\tilde{y})$. Это распределение построено в зависимости от величин обезразмеренных по толщине пограничного слоя δ . Для дальнейших расчетов необходимо определить величину δ . Из расчета пограничного слоя нам известна толщина вытеснения пограничного слоя в заданном сечении $\delta^*(x_0)$. С другой стороны зная распределение скорости u можно проинтегрировав ее определить значение δ_{in}^* . Эти значения, очевидно, должны совпадать.

$$\delta^*(x_0) = \delta_{in}^* \quad (23)$$

Выполнение этого требования обеспечиваем путем подбора толщины пограничного слоя $\delta(x_0)$.

Полученные решения $V(r)$ и $u(\tilde{R}+\tilde{y})$ сращивают между собой (22), в результате чего получается равномерно пригодное решение $v(r)$.

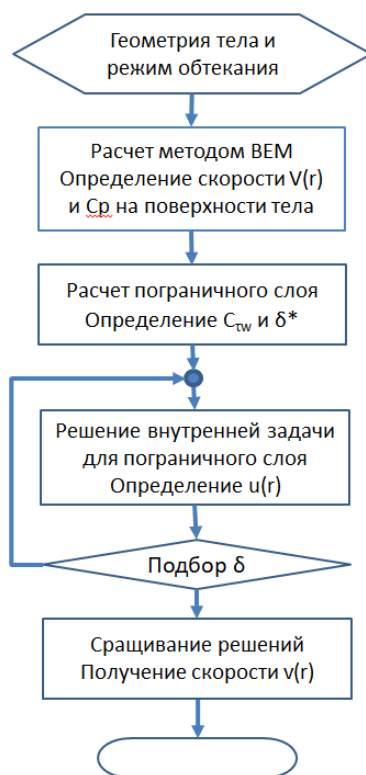


Рис. 1. Алгоритм расчета

2. Тестовый расчет

В качестве тестового примера рассмотрим обтекание корпуса дирижабля ZS2G-1, для которого имеются данные по натурным измерениям поля скорости [8] и расчету пограничного слоя [9]. Число Рейнольдса в расчете и эксперименте составляло $1,88 \cdot 10^8$. Ранее этот пример рассматривался при

разработке метода расчета сопротивления тел вращения [2].

Поле скорости, согласно данным [8] было измерено в сечении $x/L=0,7$. Для этого сечения были выполнены расчеты по представленному алгоритму. Результаты расчета сопоставлены с измерениями [8] и расчетом компании Дуглас [9] на рис. 2. Как видно, пересчет обеспечил точное согласование с натурными данными [8] и расчетами [9].

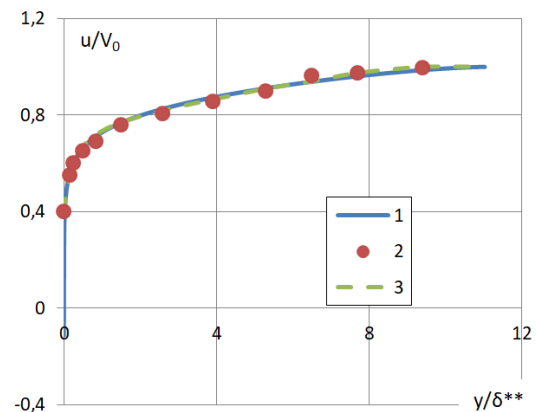


Рис. 2. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных для поля скорости в пограничном слое натурального дирижабля. $Re=1,88 \cdot 10^8$. 1 – расчет по представленному методу, 2 – эксперимент [8], 3 – расчет пограничного слоя [9].

3. CFD расчет обтекания тела вращения

Для CFD расчета обтекания тела вращения используется пакет OpenFOAM (Open source Field Operation and Manipulation). OpenFOAM это программное обеспечение с открытым исходным кодом, разработанное компанией OpenCFD и предназначенное для численного решения задач механики сплошных сред [10]. В основе метода лежит численное решение системы уравнений Навье-Стокса и неразрывности, осредненных по Рейнольдсу (метод RANS). Система замкнута высокорейнольдсовой моделью турбулентности k-epsilon.

Расчетная область представлена на рис. 3. На границах расчетной области задаются условия, необходимые для получения правильной картины течения.

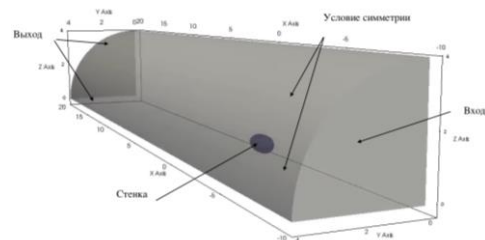


Рис. 3. расчетная область.

На входной границе (см. рис. 3) выставляется фиксированное значение компонент скорости потока и требование постоянства давления p по нормали к поверхности:

$$\begin{aligned} v_x &= V_0, \\ v_y &= v_z = 0, \\ \frac{\partial p}{\partial \vec{n}} &= 0 \end{aligned} \quad (24)$$

где V_0 – величина скорости набегающего потока.

На выходной границе задается условие Неймана для скорости, т.е. значение скорости ниже по потоку не должно изменяться по отношению к последнему ряду ячеек. Для давления на этой границе выставляется условие Дирихле, то есть давление должно равняться заданному постоянному давлению p_0 в окружающей среде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{v}}{\partial \vec{n}} &= 0, \\ p &= p_0 \end{aligned} \quad (25)$$

Тело вращения симметрично, поэтому на боковых гранях стоит условие симметрии.

Тело так же является неподвижной непроницаемой поверхностью, однако для него в вязкой жидкости должно выставляться условие прилипания, состоящее в равенстве скорости на поверхности тела нулю. Кроме того, давление на поверхности тела должно удовлетворять условию постоянства по нормали к поверхности:

$$\begin{aligned} v_x &= v_y = v_z = 0, \\ \frac{\partial p}{\partial \vec{n}} &= 0 \end{aligned} \quad (26)$$

Процесс построения сетки и используемые при этом утилиты были подробно рассмотрены в [11]. Там же можно найти примеры построения расчетной сетки.

Сеточная сходимость была исследована по безразмерному параметру y^+ :

$$y^+ = \frac{\sqrt{\rho \cdot \tau_w}}{\mu} y \quad (27)$$

где y – толщина ячейки вблизи стенки, τ_w – касательные напряжения на стенке, μ – коэффициент вязкости, ρ – плотность жидкости.

Результаты исследования сеточной сходимости были представлены в [11]. Из этих результатов следует, что при уменьшении значения y^+ до 40 и ниже, сила на теле меняется не более чем на 2%, что говорит о достижении сеточной независимости решения.

4. Расчет поля скорости вблизи тела вращения

Расчеты поля скорости выполнялись для тела вращения, полученного модификацией модели дирижабля Zhiyuan-1 [12]. Используемая для расчетов модифицированная модель, как и модель дирижабля Zhiyuan-1 имеет длину 1,8 м [12].

Ранее [11] был выполнен CFD расчет и подробный анализ обтекания модели Zhiyuan-1 с помощью метода [2]. В данной работе основное внимание сосредоточено на анализе поля скорости.

4.1. CFD расчет и его результаты

CFD расчеты выполнялись с использованием пристеночных функций. Количество ячеек в

расчетных сетках составляло порядка 3 – 4 миллионов. В отличие от работы [11] исследования в данном случае проводились в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Изменение числа Рейнольдса обеспечивалось за счет изменения скорости набегающего потока.

В результате расчета были определены коэффициенты сопротивления тела вращения при различных числах Рейнольдса (рис. 4). Коэффициент сопротивления определялся, аналогично [11], следующим образом:

$$C_D = \frac{R_x}{\rho \frac{V_\infty^2 \Lambda^2}{2}} \quad (28)$$

Где R_x – сила сопротивления движению тела, Λ – объем тела вращения.

Поскольку ранее в [11] исследовалось сопротивление исходной модели Zhiyuan-1, а в данной работе рассматривается модель модифицированной формы, для новой модели было выполнено сопоставление ее сопротивления, полученного по полуэмпирическому методу [2] и в результате CFD расчета. Результаты этого исследования представлены на рис. 4 и подробно обсуждаются в следующем разделе.

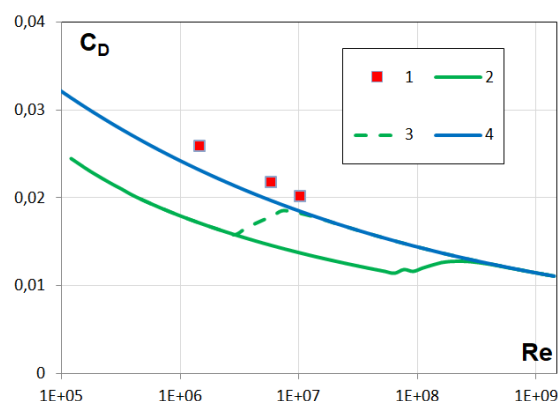


Рис. 4. Зависимость коэффициента сопротивления тела вращения от числа Рейнольдса. 1 – результаты CFD расчета. Результаты расчета по методу [2]: 2 – при $\varepsilon=0$, 3 – при $\varepsilon=5$, 4 – при $\varepsilon=10$.

Результаты расчета поля скорости в диаметральной плоскости тела вращения представлены на рис. 5 для случая $Re=10^7$. Аналогичные результаты получены для других скоростей обтекания.

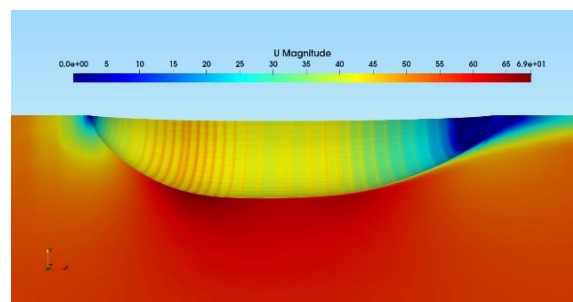


Рис. 5. CFD расчет поля скорости в диаметральной плоскости тела вращения $Re=10^7$.

Как видно из рисунка 5, в кормовой оконечности тела хорошо заметна зона сильной

подторможенности, которая обусловлена вязкими эффектами в пограничном слое. Результаты расчетов в поперечном сечении $x/L=1,0$ представлены на рис. 6. Аналогичные расчеты для точки расположенной выше по потоку (при $x/L=0,8$) приведены на рис. 7. Как и ожидалось, неоднородность поля скорости при $x/L=1,0$ оказалась выраженной гораздо сильнее. Что связано не только с ростом толщины пограничного слоя, но и с формированием отрывной области. Как показали CFD расчеты, отрыв ПС происходит при $x/L=0,88$.

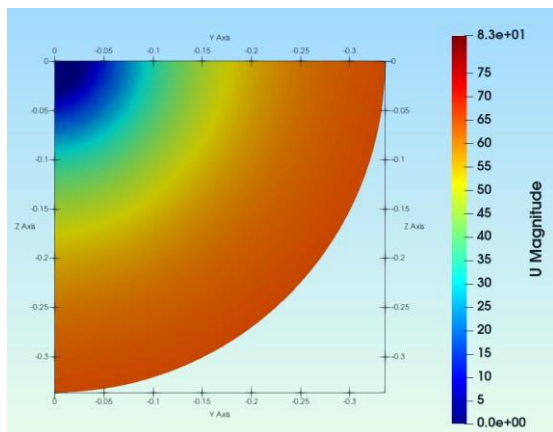


Рис.6. CFD расчет поля скорости в поперечном сечении тела вращения ($x/L=1,0$). Результаты приведены для $1/4$ -сегмента диска.

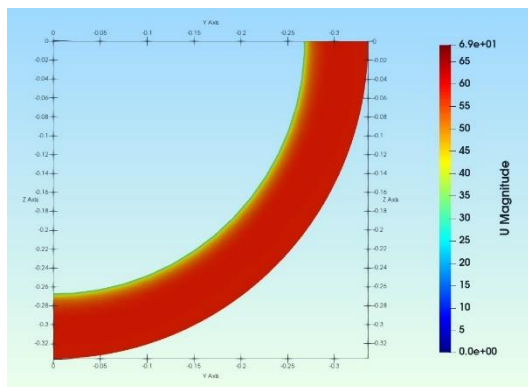


Рис.7. CFD расчет поля скорости в поперечном сечении тела вращения ($x/L=0,8$). Результаты приведены для $1/4$ -сегмента диска.

4.2. Расчет с помощью полуэмпирического метода

Метод [2] был разработан для учета масштабного эффекта при оценке коэффициента сопротивления. Отличительной особенностью этого метода, является введение форм-параметров, которые могут задаваться из общих соображений или выбираться для согласования с экспериментальными данными. К числу таких форм-параметров относятся:

ϵ – форм-параметр, моделирующий шероховатость поверхности тела или турбулентность набегающего потока

f_0^* – форм-параметр, характеризующий устойчивость ламинарного пограничного слоя.

По умолчанию в расчетном методе принимаются следующие величины этих форм-параметров: $\epsilon=0$, $f_0^* = -0,07$ [2].

Варьирование форм-параметров позволяет управлять процессом ламинарно-турбулентного перехода в рамках математической модели. В реальном течении этот процесс зависит от многих факторов, влияние которых не всегда удается оценить. В работе [2] было предложено использовать величины этих форм-параметров для учета масштабного эффекта. Так, если известна величина сопротивления тела при некотором числе Рейнольдса, указанные параметры выбираются таким образом, чтобы обеспечить наилучшее согласование расчетной зависимости с этой величиной. Далее, применяя метод [2] при выбранных параметрах, можно получить кривую сопротивления в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

Этот подход был применен для подбора параметров из условия согласования с результатами CFD расчета. На рис. 8 представлены зависимости коэффициента сопротивления при ряде значений параметра ϵ . Как видно, наилучшее согласование с результатами CFD расчета имеет место при $\epsilon=10$. Параметр f_0^* существенного влияния на результат в данном случае не оказывает и его значение принято по умолчанию. Все последующие расчеты скоростей выполнялись при выбранных значениях форм-параметров.

Расчет скорости по представленному выше методу был выполнен для ряда поперечных сечений рассматриваемого течения. Расчеты проводились для широкого диапазона чисел Рейнольдса.

На рис. 9, 10 сопоставлены результаты расчета по разработанному методу с результатами CFD расчета для поперечных сечений при $x=0,8L$ и $x=0,9L$ при трех значениях числа Рейнольдса. Выбор сечений обусловлен тем, что между ними, а именно в сечении $x=0,88L$ происходит отрыв пограничного слоя.

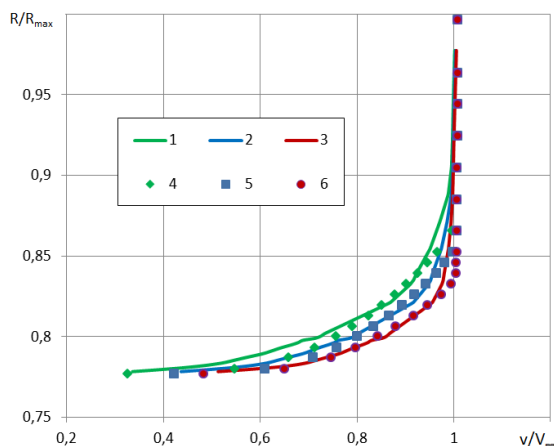


Рис. 8. Поле скорости в поперечном сечении тела вращения при $x=0,8L$. CFD расчет: 1 – $Re=1,5 \cdot 10^6$, 2 – $Re=1,0 \cdot 10^7$, 3 – $Re=1,0 \cdot 10^8$. Расчет по разработанному методу: 4 – $Re=1,5 \cdot 10^6$, 5 – $Re=1,0 \cdot 10^7$, 6 – $Re=1,0 \cdot 10^8$.

Как видно из рис. 9, в отсутствии отрыва пограничного слоя разработанный метод хорошо прогнозирует распределение скорости при всех рассмотренных значениях числа Рейнольдса.

В тоже время, расчет этого поля за точкой отрыва (рис. 10) приводит к рассогласованию решения с результатами CFD расчета в области, прилегающей

к поверхности тела вращения. Это вполне ожидаемо, поскольку метод пограничного слоя правомерно применять только до точки его отрыва. Тем не менее, даже в этом случае значительная часть внешнего профиля скорости прогнозируется с достаточной степенью точности. На практике, разработчики движителей обычно стремятся обеспечить безотрывное течение на поверхности гондолы ВРК. Что позволяет использовать разработанный метод для решения практических задач.

Следует отметить, что расчетный метод хорошо моделирует зависимость профиля скорости от числа Рейнольдса. Что крайне важно для его применения при учете масштабного эффекта.

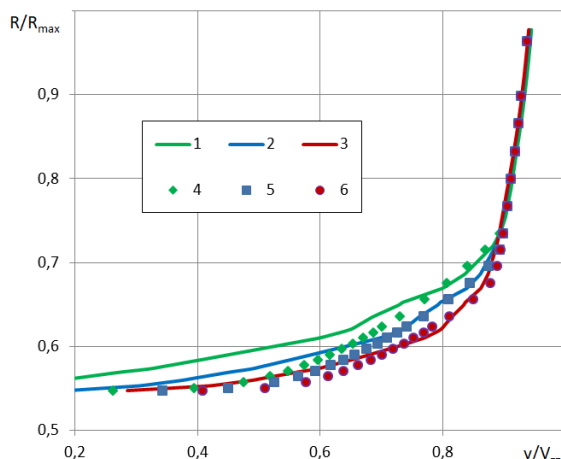


Рис. 9. Поле скорости в поперечном сечении тела вращения при $x=0,9L$. CFD расчет: 1 – $Re=1,5 \cdot 10^6$, 2 – $Re=1,0 \cdot 10^7$, 3 – $Re=1,0 \cdot 10^8$. Расчет по разработанному методу: 4 – $Re=1,5 \cdot 10^6$, 5 – $Re=1,0 \cdot 10^7$, 6 – $Re=1,0 \cdot 10^8$.

С помощью разработанного метода, для рассмотренного выше осесимметричного тела, был выполнен комплекс расчетов поля скорости при различных числах Рейнольдса и величине параметра ε . Результаты расчета для чисел Рейнольдса в диапазоне от $1 \cdot 10^5$ до $1 \cdot 10^9$ при величине формпараметра $\varepsilon=10$ представлены на рис. 10. Рассмотренный диапазон чисел Рейнольдса охватывает практически весь возможный диапазон их изменения, как в модельных, так и натурных условиях. В целом наблюдается ожидаемая тенденция: С ростом числа Рейнольдса толщина пограничного слоя уменьшается. Во внешней, по отношению к пограничному слою, области потока эпюры скорости сливаются в одну кривую, которая соответствует внешнему потенциальному течению.

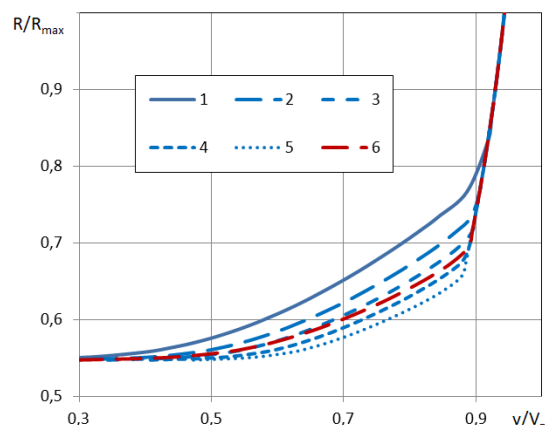


Рис. 10. Моделирование по разработанному методу поля скорости в поперечном сечении тела вращения при $x=0,9L$ при различных числах Рейнольдса. 1 – $Re=10^5$, 2 – $Re=10^6$, 3 – $Re=10^7$, 4 – $Re=10^8$, 5 – $Re=10^9$, 6 – форм-параметр $\varepsilon=5$, $Re=10^6$.

Однако, если уменьшить величину формпараметра ε , например задав его равным 5, то распределение скорости претерпевает заметные изменения. В качестве примера на рис. 10 приведен подобный расчет для $Re=10^6$. Соответствующее этому случаю решение отличается меньшей толщиной пограничного слоя (кривые 6 и 2 на рис. 10) и более резким ростом скорости при выходе на внешнюю границу пограничного слоя. Такой результат объясняется сдвигом точки ламинарно-турбулентного перехода в корму.

Этот результат показателен с точки зрения учета масштабного эффекта. Поскольку при модельных испытаниях мы не всегда можем предсказать как условия их проведения повлияют на ламинарно-турбулентный переход, мы не можем быть уверены в том, какой профиль скорости имеет место в действительности.

Заключение

Подводя итог, можно констатировать, что в рамках работы были решены следующие задачи:

- Разработан полуэмпирический метод расчета скорости вблизи тела вращения. Отличительной особенностью метода является использование интегрального метода для расчета скорости в пограничном слое и формирование единого решения для поля скорости с помощью метода сращиваемых асимптотических разложений.
- Метод был оттестирован на известных экспериментальных данных и расчетах с помощью RANS-методов.
- Расчеты проведенные с помощью представленного метода и с помощью RANS-метода показали значительное влияние числа Рейнольдса и параметров набегающего потока на профиль скорости в кормовой оконечности тела вращения.

Литература

1. Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А., 1988, Судовые движители, Л., Судостроение
2. Яковлев А.Ю., Тхант Зин Метод учета масштабного эффекта для осесимметричных тел при продольном обтекании // Морские интеллектуальные технологии, №2, т. 2, 2020, с. 28 - 34.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. – М.: Дрофа, 2003.
4. Бушковский В. А., Яковлев А. Ю. Метод граничных элементов для расчета обтекания тел, имеющих осевую симметрию // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, вып. 36(321), 2008, с.187-200.
5. Справочник по теории корабля: в трех томах. Т. 1. Гидромеханика. Соппротивление движению судов. Судовые движители. / под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985.
6. Рождественский К.В. Метод сращиваемых асимптотических разложений в гидродинамике крыла, Л.: Судостроение, 1979.
7. Федяевский К.К., Гиневский А.С., Колесников А.В. Расчет турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости. – Л.: Судостроение, 1973.
8. Cornish, J.J. and Boatwright, D.W. Application of Full Scale Boundary-Layer Measurements to Drag Reduction of Airships, Aerophysics Dept., Mississippi State University Research, Rept No. 28, 1960.
9. Tuncer Cebeci, G.J. Mosinskis, A.M.O. Smith Calculation of viscous drag and turbulent boundary-layer separation on two-dimensional and axisymmetric bodies in incompressible flows, Report No. MDC J0973-OI, 1970.
10. OpenFOAM [Электронный ресурс] <https://www.openfoam.com/>
11. Белая А.Б., Зо Хтет Аунг, Яковлев А.Ю. Обоснование применимости полуэмпирического метода расчета продольного обтекания тел вращения для прогнозирования отрывных и переходных явлений // Морские интеллектуальные технологии, 2024. – № 3-1(65). – С. 347-355. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.060
12. Liu P., Fu G., Zhu L., Wang X. Aerodynamic Characteristics of Airship Zhiyuan-1// J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.), 2013, 18(6): 679-687. DOI: 10.1007/s12204-013-1443-9

References

1. Artjushkov L., Achkinadze A., Rusetsky A. Sudovije dvizately [Sheep propulsors], Leningrad, Sudostrojenije publishing house, 1988
2. Yakovlev A. Yu., Thant Zin Metod uchjota mashtabnogo efekta dlja osesimmetrichnih tel pry prodolnom obtekanij [Scale effect evaluation method of axisymmetric body in longitudinal flow], Marine intellectual technology, No. 2, part 2, 2020, pp. 28 - 34.
3. Loytsansky L.G. Mehanika zidkosty i gaza: utchebnik dlya vuzov [Fluid and gas mechanics: textbook for universities], Moscow, "Drofa", 2003.
4. Boushkovsky V.A., Yakovlev A. Yu. Metod granichnih elementov dlja raschjota obtekanija tel imejuschih osevuju simmetriyu [Boundary elements method for calculation of axisymmetric bodies flowing], Transactions of Krylov shipbuilding research center, vol. 36(321), 2008, pp.187-200.
5. Spavocnik po teorijj korablja [Handbook on marine architect and naval engineering] ed. by prof. Vojtkunsky Ya. I., Vol. 1, Leningrad, Sudostrojenije publishing house, 1985.
6. Rozdestvensky K.V. Metod sraschivajemyh asimptoticheskikh razlogenij v gidrodynamice kryla [The method of spliced asymptotic expansions in wing hydrodynamics], Leningrad, Sudostrojenije publishing house, 1979.
7. Fedjaevsky K.K., Ginevsky A.S., Kolesnikov A.V. Raschjot turbulentnogo pogrannichnogo sloja nesgimajemoy zidkosty [Calculation of the turbulent boundary layer of an incompressible fluid], Leningrad, Sudostrojenije publishing house, 1973.
8. Cornish, J.J. and Boatwright, D.W. Application of Full Scale Boundary-Layer Measurements to Drag Reduction of Airships, Aerophysics Dept., Mississippi State University Research, Rept No. 28, 1960.
9. Tuncer Cebeci, G.J. Mosinskis, A.M.O. Smith Calculation of viscous drag and turbulent boundary-layer separation on two-dimensional and axisymmetric bodies in incompressible flows, Report No. MDC J0973-OI, 1970.
10. OpenFOAM <https://www.openfoam.com/>
11. Belaia A.B. Zo Htet Aung, Yakovlev A.Yu. Obosnovaniye primenimosty poluempiricheskogo metoda raschjota prodolnogo obtekanija tel vraschenija dlja prognozirovaniya otrivnih i perehodnyh yavleniy [Applicability substantiation of the semi-empirical calculation method of axisymmetric body in longitudinal flow for predicting separation and transient phenomena], Marine intellectual technology, No. 3, part 1, 2024, pp. 347 - 355. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.060
12. Liu P., Fu G., Zhu L., Wang X. Aerodynamic Characteristics of Airship Zhiyuan-1// J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.), 2013, 18(6): 679-687. DOI: 10.1007/s12204-013-1443-9

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

Кадомцева Алена Борисовна, старший преподаватель кафедры гидроаэромеханики и морской акустики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kgm@smtu.ru

Alena B. Kadomtseva, Senior teacher of Hydrodynamic and marine acoustic department, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kgm@smtu.ru

Зо Хтет Аунг, аспирант кафедры гидроаэромеханики и морской акустики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kgm@smtu.ru

Zo Htet Aung, Postgraduate student of Hydrodynamic and marine acoustic department, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kgm@smtu.ru

Яковлев Алексей Юрьевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой гидроаэромеханики и морской акустики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kgm@smtu.ru

Aleksey Yu. Yakovlev, Dr. Sci. (Eng.), Assistant professor, Head of Hydrodynamic and marine acoustic department, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kgm@smtu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 09.02.2026.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.02.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 24.02.2026.

Научная статья

УДК 629.5.02; 614.86; 629.331

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.033>

О моделировании пожароопасной ситуации на судне с использованием цепей Маркова

Таранцев А.А.¹ t_54@mail.ru, Маринов М.Л.¹ marinlomsky@gmail.com,Коновалов И.Н.¹ info@iptran.ru, Королёв О.А.¹ korolev@iptran.ru¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. В статье рассмотрена проблема моделирования развития пожара в отсеках судов. Показано, что такие пожары могут принимать динамический характер. И если командой или системой пожаротушения не будет предпринято эффективных мер, то возможен рост ущерба вплоть до прогорания переборок и риска затопления судна. Для моделирования процессов «пожар-тушение-ущерб» предложено использовать математический аппарат цепей Маркова. Представлены несколько цепей в виде графов переходов из одного состояния в последующие. В статье рассмотрены два варианта моделирования – аналитическое решение системы дифференциальных уравнений, соответствующей графу переходов, и численное пошаговое решение. Приведены соответствующие примеры. Сделаны выводы о целесообразности дальнейших исследований в части моделирования пожароопасных ситуаций с разными типами судов – паромов, сухогрузов, контейнеровозов и др., совершенствования методов моделирования и внесение изменений в соответствующие нормативные документы.

Ключевые слова: судно, отсек, пожар, тушение, моделирование, цепи Маркова

Финансирование: работа выполнена в рамках исполнения государственного задания ИПТ РАН № 075-00605-26-00 на 2026 год и плановый период 2027 и 2028 годов за счет средств предоставленной Минобрнауки России субсидии (соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 20.01.2026 № 075-03-2026-498)

Для цитирования: Таранцев А.А., Маринов М.Л., Коновалов И.Н., Королёв О.А. О моделирования пожароопасной ситуации на судне с использованием цепей Маркова. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 320—326. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.033.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.033>

On modeling a fire hazard on a ship using Markov chains

Alexander A. Tarantsev¹ t_54@mail.ru, Marin L. Marinov¹ marinlomsky@gmail.com,Ivan N. Konovalov¹ simulator.ipt@outlook.com, Oleg A. Korolev¹ korolev@iptran.ru¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences

Abstract. The article discusses the problem of modeling the development of a fire in a ship's compartment. It is shown that such fires can become dynamic, and if no effective measures are taken by the crew or the fire-extinguishing system, the damage may increase to the point of burning through the bulkheads and risking the ship's sinking. To model the "fire-extinguishing-damage" processes, the article proposes the use of Markov chains. Several chains are presented in the form of transition graphs from one state to the next. The article discusses two modeling options: an analytical solution of a system of differential equations corresponding to the transition graph, and a numerical step-by-step solution. Examples are provided to illustrate these approaches. The article concludes that further research is necessary to model fire hazards on various types of vessels, such as ferries, dry cargo ships, container ships, and others, to improve modeling methods, and to update relevant regulatory documents.

Key words: ship, compartment, fire, extinguishing, modeling, Markov chains

Financial Support: the work was carried out under the state assignment of the IPT RAS № 075-00605-26-00 for 2026 and the planned period of 2027 and 2028 funded by a subsidy provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement on the provision of subsidies from the federal budget for financial support for the implementation of the state task dated 20 January 2026 № 075-03-2026-498)

For citation: Alexander A. Tarantsev, Marin L. Marinov, Ivan N. Konovalov, Oleg A. Korolev. On modeling a fire hazard on a ship using Markov chains Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 320—326. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.033.

Введение

Актуальность настоящей статьи вызвана следующими обстоятельствами. Во-первых, интенсивным развитием перевозок грузов и пассажиров морским и речным транспортом, что является как общемировой тенденцией, так и российской, на что указано в Транспортной стратегии

РФ [1]. Во-вторых, процессы перевозки на судах грузов – топлива, контейнеров, транспортных средств, сыпучих грузов, продовольствия и др., а также пассажиров связаны со значительным риском, в т.ч. пожарным (рис.1). И хотя этой проблеме уделяется значительное внимание [2,3], она не перестаёт быть актуальной.



а)



б)

Рис. 1. Иллюстрация пожара во внутреннем помещении судна (а) и выход пожара на палубу (б)

Разумеется, вопросам пожарной безопасности судов на всех этапах эксплуатации (в плавании, в порту, при ремонте и постройке) уделяется значительное внимание. Суды различных типов оснащены автоматическими системами сигнализации и пожаротушения [2], насосными установками с противопожарным водопроводом, кранами, рукавами и стволами, создаются пожарные команды (тушение пожара, эвакуации людей и оказания им помощи) во главе с опытным членом экипажа [4,5]

Тем не менее, вопросам моделирования развития и тушения пожара на судах необходимо уделять особое внимание. Одним из эффективных методов решения подобных задач является математический аппарат цепей Маркова [6,7]. Данное направление успешно развивается в ИПТ РАН, о чём свидетельствуют публикации [8-14].

В данной статье будут рассмотрено применение цепей Маркова с поглощающими состояниями [6] применительно к моделированию пожароопасных ситуаций на судах.

Задачи моделирование развития пожароопасных ситуаций в отсеке судна

Развитие и тушение пожара в отсеке судна может проходить по различным сценариям, некоторые из которых приведены в таблицах 1-4. Сценарии могут характеризоваться набором состояний $\{S\}$ и переходов $\{I\}$ из одного состояния в другое, что представлено в виде ориентированных «взвешенных» графов на рисунках 2-5. Конечно, пожароопасных ситуаций в отсеке судна может быть большое количество, но этому целесообразно посвятить отдельные научные статьи.

Таблица 1

Состояния отсека при возгорании

$\{S\}$	Состояния
S_1	Возгорание в отсеке
S_2	Экипаж тушит пожар с применением подручных средств (огнетушителей)
S_3	Пожар потушен, ущерб незначительный

Примечание: S_3 – поглощающее состояние

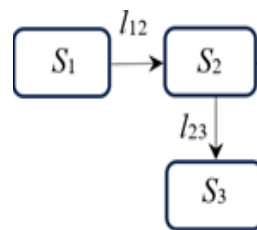


Рис. 2. Графы переходов применительно к вариантам пожара в отсеке судна в соответствии с таблицей 1

Таблица 2

Состояния отсека при среднем пожаре

$\{S\}$	Состояния
S_1	Возгорание в отсеке
S_2	Экипаж тушит пожар с применением подручных средств (огнетушителей)
S_3	Пожар потушен, ущерб минимальный
S_4	Пожар тушится с применением АУП и/или пожарной командой с применением пожарных стволов
S_5	Пожар потушен, ущерб значительный как от ОФП, так и от пролитой воды

Примечание: S_3 и S_5 – поглощающие состояния

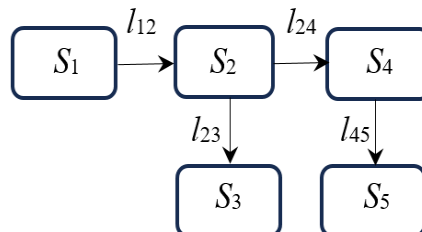


Рис. 3. Графы переходов применительно к вариантам пожара в отсеке судна в соответствии с таблицей 2

Таблица 3

Состояния отсека при крупном пожаре

$\{S\}$	Состояния
S_1	Возгорание в отсеке
S_2	Экипаж тушит пожар с применением подручных средств (огнетушителей)
S_3	Пожар потушен, ущерб минимальный
S_4	Пожар тушится с применением АУП и/или пожарной командой пожарными стволами
S_5	Пожар потушен, ущерб значительный как от ОФП, так и от пролитой воды
S_6	Пожар тушится безуспешно с применением имеющихся сил и средств
S_7	Ущерб неприемлемый, риск прогорания переборок и палубы, серьезные повреждения судна, опасность для экипажа и пассажиров

Примечание: S_3 , S_5 и S_7 – поглощающие состояния

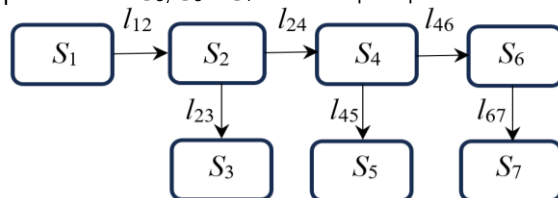


Рис. 4. Графы переходов применительно к вариантам пожара в отсеке судна в соответствии с таблицей 3

Таблица 4
Состояния при катастрофическом пожаре

{S}	Состояния
S ₁	Возгорание в отсеке
S ₂	Экипаж тушит пожар с применением подручных средств (огнетушителей)
S ₃	Пожар потушен, ущерб минимальный
S ₄	Пожар тушится с применением АУП и/или пожарной командой пожарными стволами
S ₅	Пожар потушен, ущерб значительный как от ОФП, так и от пролитой воды
S ₆	Пожар тушится с применением имеющихся сил и средств
S ₇	Ущерб неприемлемый, серьезные повреждения судна
S ₈	Пожар тушится с применением дополнительных сил и средств
S ₉	Прогорание корпуса, судно тонет

Примечание: S₃, S₅, S₇ и S₉ – поглощающие состояния

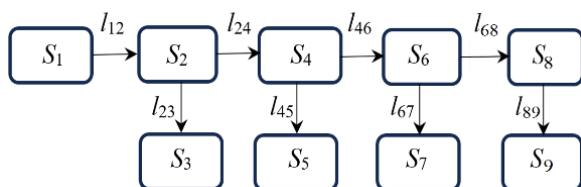


Рис. 5. Графы переходов применительно к вариантам пожара в отсеке судна в соответствии с таблицей 4

Задача, рассматриваемая в данной статье, заключается в том, чтобы, зная исходные вероятности $\{P\}$ состояний $\{S\}$ и веса $\{l\}$ переходов, оценить конечные (установившиеся) вероятности $\{P^k\}$, прежде всего вероятности поглощающих состояний. Данная задача может быть решена двумя методами: пошаговым [7] и аналитическим (метод Колмогорова А.Н.) [15]. В первом случае марковская цепь с дискретным временем, во втором – с непрерывным.

Моделирование развития пожароопасных ситуаций в отсеке судна цепью Маркова с дискретным временем

Для цепи Маркова с дискретным временем веса ребер (см. рисунки 2-5) – это вероятности переходов $p_{ij} = l_{ij}$. Цепь при этом характеризуется матрицей P размером $n \times n$, (n – число состояний $\{S\}$), которая имеет вид:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

в которой вероятности диагональных элементов $p_{jj} = 1 - \sum_{i \neq j} p_{ji}$, $j = 1, \dots, n$, а сумма вероятностей в каждой j -й строке равна 1. Задаются начальные вероятности состояний $\{S\}$: $P_1^H, \dots, P_n^H$ (как правило, $P_1^H = 1$, $P_j^H = 0$, $j = 2, \dots, n$) и с помощью пошаговой процедуры [7] на основе матрицы P находят вероятности $P_1^k, \dots, P_n^k$ конечных состояний цепи, когда процесс стабилизируется, т.е.: $[P_1^H, \dots, P_n^H] \rightarrow [P_1^k, \dots, P_n^k]$. Разработана компьютерная программа *markoff.exe*, упрощающая нахождение численных значений вероятностей $P_1^k, \dots, P_n^k$.

Пример 1. Для графа переходов на рисунке 2 матрица P имеет вид:

$$P = \begin{bmatrix} 1 - p_{12} & p_{12} & 0 \\ 0 & 1 - p_{23} & p_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Если $p_{12} = 0,1$; $p_{23} = 0,2$ (вероятности переходов заданы условно), то матрица принимает вид:

$$P = \begin{bmatrix} 0,9 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0,8 & 0,2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Для матрицы (3), используя пошаговый метод [7] (программу *markoff*), получаем динамику вероятностей $\{P\}$ (см. таблицу 5) и видим, что уже на 101-м шаге процесс стабилизировался и $P_1^k = P_2^k = 0$; $P_3^k = 1$. Из таблицы 5 также следует, что вероятность поглощающего состояния S₃ единична – пожар в отсеке потушен, ущерб незначительный.

Таблица 5
Динамика вероятностей состояний для графа на рисунке 2

k	P ₁	P ₂	P ₃
0	1.0000	0.0000	0.0000
1	0.9000	0.1000	0.0000
2	0.8100	0.1700	0.0200
3	0.7290	0.2170	0.0540
4	0.6561	0.2465	0.0974
5	0.5905	0.2628	0.1467
6	0.5314	0.2693	0.1993
7	0.4783	0.2686	0.2531
8	0.4305	0.2627	0.3068
9	0.3874	0.2532	0.3594
10	0.3487	0.2413	0.4100
20	0.1216	0.1100	0.7684
30	0.0424	0.0412	0.9165
31	0.0382	0.0372	0.9247
40	0.0148	0.0146	0.9706
50	0.0052	0.0051	0.9897
60	0.0018	0.0018	0.9964
70	0.0006	0.0006	0.9987
80	0.0002	0.0002	0.9996
90	0.0001	0.0001	0.9999
100	0.0000	0.0000	0.9999
101	0.0000	0.0000	1.0000

Примечания: k – номер шага; жирным шрифтом выделены конечные вероятности

Оценить вероятность поглощающего состояния можно было бы и без проведения расчетов – поскольку в данном случае поглощающее состояние S₃ одно, то вероятность его в итоге будет равна 1. Далее рассмотрим более сложные случаи.

Пример 2. У графа на рисунке 3 поглощающих состояний два: S₃ и S₅, тогда $P_3^k + P_5^k = 1$. Однако необходимо оценить P_3^k и P_5^k по отдельности. Положив, что вероятности переходов $p_{12} = 0,1$; $p_{23} = 0,2$; $p_{24} = 0,3$; $p_{45} = 0,4$ (p_{ij} заданы также условно), матрицу P по аналогии с (2) и (3) можно представить в виде:

$$P = \begin{bmatrix} 0,9 & 0,1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & 0,2 & 0,3 & 0 \\ 0 & 0 & 1,0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,6 & 0,4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1,0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Как и в примере 1, для матрицы (4) при начальных условиях $P_1^H = 1, P_j^H = 0, j = 2, \dots, 5$, используя пошаговый метод [7], получаем динамику вероятностей $\{P\}$ (см. таблицу 6) и видим, что уже на 94-м шаге процесс стабилизировался и $P_1^K = P_2^K = 0; P_3^K = 0,4; P_4^K = 0; P_5^K = 0,6$.

Таблица 6

Динамика вероятностей состояний для графа на рисунке 3

k	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
0	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.5905	0.1398	0.1079	0.0933	0.0685
10	0.3487	0.0869	0.2258	0.0819	0.2568
15	0.2059	0.0515	0.2971	0.0510	0.3946
20	0.1216	0.0304	0.3392	0.0304	0.4785
25	0.0718	0.0179	0.3641	0.0179	0.5282
30	0.0424	0.0106	0.3788	0.0106	0.5576
35	0.0250	0.0063	0.3875	0.0063	0.5750
40	0.0148	0.0037	0.3926	0.0037	0.5852
45	0.0087	0.0022	0.3956	0.0022	0.5913
50	0.0052	0.0013	0.3974	0.0013	0.5948
55	0.0030	0.0008	0.3985	0.0008	0.5970
60	0.0018	0.0004	0.3991	0.0004	0.5982
65	0.0011	0.0003	0.3995	0.0003	0.5989
70	0.0006	0.0002	0.3997	0.0002	0.5994
75	0.0004	0.0001	0.3998	0.0001	0.5996
80	0.0002	0.0001	0.3999	0.0001	0.5999
85	0.0001	0.0000	0.3999	0.0000	0.5999
90	0.0001	0.0000	0.4000	0.0000	0.5999
94	0.0000	0.0000	0.4000	0.0000	0.6000

Из таблицы 6 следует, что в итоге после тушения пожара в отсеке судна при вышеуказанных вероятностях переходов $\{p_{ij}\}$ отражающих скорость процессов «горение-тушение», можно ожидать, что вероятность минимального ущерба будет 0,4, а вероятность значительного – 0,6.

Пример 3. Граф на рисунке 4 имеет три поглощающих состояния: S_3, S_5 и S_7 , в следствие чего $P_3^K + P_5^K + P_7^K = 1$. Для оценки вероятностей P_3^K, P_5^K и P_7^K , положив, вероятности переходов равными $p_{12} = 0,1; p_{23} = 0,2; p_{24} = 0,3; p_{45} = 0,4; p_{46} = 0,5; p_{67} = 0,6$ ($\{p_{ij}\}$ заданы также условно), матрицу P можно представить в виде:

$$P = \begin{bmatrix} 0,9 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & 0,2 & 0,3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0,4 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1,0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,4 & 0,6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Как и в предыдущих примерах, для матрицы (5) при начальных условиях $P_1^H = 1, P_j^H = 0, j = 2, \dots, 7$, используя пошаговый метод [7], можно оценить динамику вероятностей $\{P\}$ (см. таблицу 7) и увидеть, что на 96-м шаге процесс стабилизировался и $P_1^K = P_2^K = P_4^K = P_6^K = 0; P_3^K = 0,4; P_5^K = 0,2667; P_7^K = 0,3333$.

Таблица 7

Динамика вероятностей состояний для графа на рисунке 4

k	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
0	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.5905	0.1398	0.1079	0.0495	0.0499	0.0363	0.0261
10	0.3487	0.0869	0.2258	0.0325	0.1361	0.0319	0.1382
15	0.2059	0.0515	0.2971	0.0193	0.1895	0.0193	0.2176
20	0.1216	0.0304	0.3392	0.0114	0.2211	0.0114	0.2649
25	0.0718	0.0179	0.3641	0.0067	0.2397	0.0067	0.2930
30	0.0424	0.0106	0.3788	0.0040	0.2508	0.0040	0.3095
35	0.0250	0.0063	0.3875	0.0023	0.2573	0.0023	0.3193
40	0.0148	0.0037	0.3926	0.0014	0.2611	0.0014	0.3250
45	0.0087	0.0022	0.3956	0.0008	0.2634	0.0008	0.3284
50	0.0052	0.0013	0.3974	0.0005	0.2647	0.0005	0.3304
55	0.0030	0.0008	0.3985	0.0003	0.2655	0.0003	0.3316
60	0.0018	0.0004	0.3991	0.0002	0.2660	0.0002	0.3323
65	0.0011	0.0003	0.3995	0.0001	0.2663	0.0001	0.3327
70	0.0006	0.0002	0.3997	0.0001	0.2664	0.0001	0.3330
75	0.0004	0.0001	0.3998	0.0000	0.2665	0.0000	0.3331
80	0.0002	0.0001	0.3999	0.0000	0.2666	0.0000	0.3332
85	0.0001	0.0000	0.3999	0.0000	0.2666	0.0000	0.3333
90	0.0001	0.0000	0.4000	0.0000	0.2666	0.0000	0.3333
95	0.0000	0.0000	0.4000	0.0000	0.2666	0.0000	0.3333
96	0.0000	0.0000	0.4000	0.0000	0.2667	0.0000	0.3333

Как и в предыдущих примерах, для матрицы (6) при начальных условиях $P_1^H = 1, P_j^H = 0, j = 2, \dots, 9$, используя пошаговый метод [7], можно оценить динамику вероятностей $\{P\}$ (см. таблицу 8) и

увидеть, что на 98-м шаге процесс стабилизировался и $P_1^K = P_2^K = P_4^K = P_6^K = P_8^K = 0; P_3^K = 0,4; P_5^K = 0,2667; P_7^K = 0,1538; P_9^K = 0,1795$.

Таблица 8

Динамика вероятностей состояний для графа на рисунке 5

k	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9
0	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.9000	0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.8100	0.1700	0.0200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.7290	0.2170	0.0540	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

4	0.6561	0.2465	0.0974	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.5905	0.1398	0.1079	0.0495	0.0499	0.0363	0.0261	0.0000	0.0000
10	0.3487	0.0869	0.2258	0.0325	0.1361	0.0319	0.1382	0.0000	0.0000
15	0.2059	0.0515	0.2971	0.0193	0.1895	0.0193	0.2176	0.0000	0.0000
20	0.1216	0.0304	0.3392	0.0114	0.2211	0.0114	0.2649	0.0000	0.0000
25	0.0718	0.0179	0.3641	0.0067	0.2397	0.0067	0.2930	0.0000	0.0000
30	0.0424	0.0106	0.3788	0.0040	0.2508	0.0040	0.3095	0.0000	0.0000
35	0.0250	0.0063	0.3875	0.0023	0.2573	0.0023	0.3193	0.0000	0.0000
40	0.0148	0.0037	0.3926	0.0014	0.2611	0.0014	0.3250	0.0000	0.0000
45	0.0087	0.0022	0.3956	0.0008	0.2634	0.0008	0.3284	0.0000	0.0000
50	0.0052	0.0013	0.3974	0.0005	0.2647	0.0005	0.3304	0.0000	0.0000
55	0.0030	0.0008	0.3985	0.0003	0.2655	0.0003	0.3316	0.0000	0.0000
60	0.0018	0.0004	0.3991	0.0002	0.2660	0.0002	0.3323	0.0000	0.0000
65	0.0011	0.0003	0.3995	0.0001	0.2663	0.0001	0.3327	0.0000	0.0000
70	0.0006	0.0002	0.3997	0.0001	0.2664	0.0001	0.3330	0.0000	0.0000
75	0.0004	0.0001	0.3998	0.0000	0.2665	0.0000	0.3331	0.0000	0.0000
80	0.0002	0.0001	0.3999	0.0000	0.2666	0.0000	0.3332	0.0000	0.0000
85	0.0001	0.0000	0.3999	0.0000	0.2666	0.0000	0.3333	0.0000	0.0000
90	0.0001	0.0000	0.4000	0.0000	0.2666	0.0000	0.3333	0.0000	0.0000
95	0.0000	0.0000	0.4000	0.0000	0.2666	0.0000	0.3333	0.0000	0.0000
96	0.0000	0.0000	0.4000	0.0000	0.2667	0.0000	0.3333	0.0000	0.0000
98	0.0000	0.0000	0.4000	0.0000	0.2667	0.0000	0.1538	0.0000	0.1795

Из таблицы 8 следует, что в результате пожара в отсеке судна при вышеуказанных вероятностях переходов $\{p_{ij}\}$, можно ожидать, что вероятность минимального ущерба, как и ранее, будет 0,4, вероятность значительного ущерба 0,2667, вероятность неприемлемого ущерба 0,1538, а вероятность затопления судна 0,1795.

Подытоживая данный раздел, можно заключить следующее. Во-первых, используя математический аппарат цепей Маркова с дискретным временем, возможно построить графы переходов, достаточно точно описывающие сложные процессы, в частности, пожары в отсеках судов. Во-вторых, на основе графов, применяя пошаговый метод расчёта динамики вероятностей состояний, можно подобрать такие вероятности переходов, чтобы добиться приемлемых величин конечных (поглощающих) вероятностей состояний и дать соответствующие практические рекомендации для реальных объектов или процессов. В-третьих, для повышения объективности оценки вероятностей состояний (например, судна при пожаре), целесообразно использовать и математический аппарат цепей Маркова с непрерывным временем.

Моделирование развития пожароопасных ситуаций в отсеке судна цепью Маркова с непрерывным временем

В 30-х годах XX века выдающийся математик А.Н. Колмогоров, исследуя цепи Маркова, предложил перейти от вероятностей переходов $\{p_{ij}\}$ к интенсивностям переходов $\{\lambda_{ij}\}$ [15], т.е. к цепям с непрерывным временем. Это позволило перейти от матриц P , описывающих графы переходов, к системам линейных дифференциальных уравнений 1-го порядка. Это, в свою очередь, позволило перейти от пошагового метода оценки вероятностей состояний графа к аналитическим (1) решениям в виде функций времени $P_j(t), j = 1, \dots, n$ при начальных условиях $P_1^H = 1, P_j^H = 0, j = 2, \dots, n$. Следует обратить внимание, что если вероятности переходов $\{p_{ij}\}$ не имеют размерности, то

размерность интенсивностей переходов $\{\lambda_{ij}\}$ обратно пропорциональна времени

Рассмотрим данный подход применительно к графам на рисунках 2-5, полагая $\{l_{ij}\} \rightarrow \{\lambda_{ij}\}$.

Пример 5. Для графа переходов на рисунке 2 справедлива система из трёх ($n = 3$) дифференциальных уравнений 1-го порядка:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = -\lambda_{12}P_1, \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_{12}P_1 - \lambda_{23}P_2 \\ \frac{dP_3}{dt} = \lambda_{23}P_2, \end{cases} \quad (7)$$

Её аналитическое решение при вышеуказанных начальных условиях получено в явном виде:

$$\begin{cases} P_1 = e^{-\lambda_{12}t}, \\ P_2 = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{23}-\lambda_{12}} [e^{-\lambda_{12}t} - e^{-\lambda_{23}t}], \\ P_3 = 1 - \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{23}-\lambda_{12}} e^{-\lambda_{12}t} + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{23}-\lambda_{12}} e^{-\lambda_{23}t} \end{cases} \quad (8)$$

Очевидно, должно выполняться условие $\lambda_{23} \neq \lambda_{12}$. Конечные вероятности состояний марковской цепи (рисунок 2), полученные из (8) при $t \rightarrow \infty$: $P_1^K = P_2^K = 0, P_3^K = 1$. Поскольку состояние S_3 поглощающее, то и его конечное состояние равно 1. Это согласуется результатом примера 1 для цепи с дискретным временем.

Пример 6. Более сложный случай – граф на рисунке 3. Ему соответствует система из 5-и ($n = 5$) дифференциальных уравнений 1-го порядка:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = -\lambda_{12}P_1, \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_{12}P_1 - (\lambda_{23} + \lambda_{24})P_2, \\ \frac{dP_3}{dt} = \lambda_{23}P_2, \\ \frac{dP_4}{dt} = \lambda_{24}P_2 - \lambda_{45}P_4, \\ \frac{dP_5}{dt} = \lambda_{45}P_4 \end{cases} \quad (9)$$

Её аналитическое решение при начальных условиях $P_1^H = 1, P_j^H = 0, j = 2, \dots, 5$ имеет вид:

$$\begin{cases} P_1 = e^{-\lambda_{12}t}, \\ P_2 = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{23}+\lambda_{24}-\lambda_{12}} [e^{-\lambda_{12}t} - e^{-(\lambda_{23}+\lambda_{24})t}], \\ P_3 = \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{23}+\lambda_{24}} - \frac{\lambda_{12}\lambda_{23}}{\lambda_{23}+\lambda_{24}-\lambda_{12}} \left[\frac{e^{-\lambda_{12}t}}{\lambda_{12}} - \frac{e^{-(\lambda_{23}+\lambda_{24})t}}{\lambda_{23}+\lambda_{24}} \right], \\ P_4 = \frac{\lambda_{12}\lambda_{24}}{\lambda_{23}+\lambda_{24}-\lambda_{12}} \left[\frac{e^{-\lambda_{12}t}}{\lambda_{45}-\lambda_{12}} - \frac{e^{-(\lambda_{23}+\lambda_{24})t}}{\lambda_{45}-\lambda_{23}-\lambda_{24}} \right] + f_0, \\ P_5 = \frac{\lambda_{12}\lambda_{24}\lambda_{45}}{\lambda_{23}+\lambda_{24}-\lambda_{12}} \left[\frac{1-e^{-\lambda_{12}t}}{(\lambda_{45}-\lambda_{12})\lambda_{12}} - f_1 + f_2 \right], \end{cases} \quad (10)$$

где $f_0 = \frac{(\lambda_{23}+\lambda_{24}-\lambda_{12})e^{-\lambda_{45}t}}{(\lambda_{45}-\lambda_{12})(\lambda_{45}-\lambda_{23}-\lambda_{24})}, f_1 = \frac{1-e^{-(\lambda_{23}+\lambda_{24})t}}{(\lambda_{45}-\lambda_{23}-\lambda_{24})(\lambda_{23}+\lambda_{24})},$
 $f_2 = \frac{(\lambda_{23}+\lambda_{24}-\lambda_{12})(1-e^{-\lambda_{45}t})}{(\lambda_{45}-\lambda_{12})(\lambda_{45}-\lambda_{23}-\lambda_{24})\lambda_{45}}.$

Конечные вероятности состояний марковской цепи (рис.2-б), полученные из (10) при $t \rightarrow \infty: P_1^K = P_2^K = 0, P_3^K = \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{23}+\lambda_{24}}, P_4^K = 0, P_5^K = \frac{\lambda_{24}}{\lambda_{23}+\lambda_{24}}.$ Сумма $\sum_{i=1}^5 P_i^K = 1.$ Должны выполняться условия: $\lambda_{23} + \lambda_{24} - \lambda_{12} \neq 0; \lambda_{45} - \lambda_{12} \neq 0.$

Получено её аналитическое решение при начальных условиях $P_1^H = 1, P_j^H = 0, j = 2, \dots, 7$ имеет вид:

$$\begin{cases} P_1 = e^{-\lambda_{12}t} \\ P_2 = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{23}+\lambda_{24}-\lambda_{12}} [e^{-\lambda_{12}t} - e^{-(\lambda_{23}+\lambda_{24})t}] \\ P_3 = \frac{\lambda_{12}\lambda_{23}}{\lambda_{23}+\lambda_{24}-\lambda_{12}} - \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{23}+\lambda_{24}-\lambda_{12}} \left[\frac{e^{-\lambda_{12}t}}{\lambda_{12}} - \frac{e^{-\lambda_{234}t}}{\lambda_{23}+\lambda_{24}} \right] \\ P_4 = \frac{\lambda_{12}\lambda_{24}}{\lambda_{234}-\lambda_{12}} \left[\frac{e^{-\lambda_{12}t}}{\lambda_{456}-\lambda_{12}} - \frac{e^{-\lambda_{234}t}}{\lambda_{456}-\lambda_{234}} + \frac{(\lambda_{234}-\lambda_{12})e^{-\lambda_{456}t}}{(\lambda_{456}-\lambda_{12})(\lambda_{456}-\lambda_{234})} \right] \\ P_5 = \frac{\lambda_{12}\lambda_{24}\lambda_{45}}{\lambda_{234}-\lambda_{12}} \left[\frac{1-e^{-\lambda_{12}t}}{(\lambda_{456}-\lambda_{12})\lambda_{12}} - \frac{1-e^{-\lambda_{234}t}}{(\lambda_{456}-\lambda_{234})\lambda_{234}} + \frac{(\lambda_{234}-\lambda_{12})(1-e^{-\lambda_{456}t})}{(\lambda_{456}-\lambda_{12})(\lambda_{456}-\lambda_{234})\lambda_{456}} \right] \\ P_6 = c_1 e^{-\lambda_{12}t} - c_2 e^{-\lambda_{234}t} + c_3 e^{-\lambda_{456}t} - (c_1 - c_2 + c_3) e^{-\lambda_{67}t} \\ P_7 = c - c_1 \frac{\lambda_{67}}{\lambda_{12}} e^{-\lambda_{12}t} + c_2 \frac{\lambda_{67}}{\lambda_{234}} e^{-\lambda_{234}t} - c_3 \frac{\lambda_{67}}{\lambda_{456}} + (c_1 - c_2 + c_3) e^{-\lambda_{67}t} \end{cases} \quad (12)$$

В выражении (12) приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \lambda_{234} &= \lambda_{23} + \lambda_{24}; \lambda_{456} = \lambda_{45} + \lambda_{46}; \\ c_1 &= \frac{\lambda_{12}\lambda_{24}\lambda_{46}}{(\lambda_{456}-\lambda_{12})(\lambda_{234}-\lambda_{12})(\lambda_{67}-\lambda_{12})}; \\ c_2 &= \frac{\lambda_{12}\lambda_{24}\lambda_{46}}{(\lambda_{456}-\lambda_{234})(\lambda_{234}-\lambda_{12})(\lambda_{67}-\lambda_{234})}; \\ c_3 &= \frac{\lambda_{12}\lambda_{24}\lambda_{46}}{(\lambda_{456}-\lambda_{234})(\lambda_{456}-\lambda_{12})(\lambda_{67}-\lambda_{456})}; \\ c &= P_7^K = c_1 \left(\frac{\lambda_{67}}{\lambda_{12}} - 1 \right) - c_2 \left(\frac{\lambda_{67}}{\lambda_{234}} - 1 \right) + c_3 \left(\frac{\lambda_{67}}{\lambda_{456}} - 1 \right). \end{aligned}$$

Нетрудно проверить, что при интенсивностях переходов $\lambda_{12} = 0,1; \lambda_{23} = 0,2; \lambda_{24} = 0,3; \lambda_{45} = 0,4; \lambda_{46} = 0,5; \lambda_{67} = 0,6$ из (12) будут получены такие же значения конечных вероятностей, как и в примере 3 для цепи Маркова с дискретным временем: $P_1^K = P_2^K = P_4^K = P_6^K = 0; P_3^K = 0,4; P_5^K = 0,2667; P_7^K = 0,3333.$ Это полностью согласуется с результатами примера 3. Следует иметь ввиду, что для (12) интенсивности $\{\lambda_{ij}\}$ должны быть подобраны так, чтобы исключалось деление на 0.

Например, если $\lambda_{12} = 0,1; \lambda_{23} = 0,2; \lambda_{24} = 0,3$ и $\lambda_{45} = 0,4$, то для установившегося процесса ($t \rightarrow \infty$) из (10) находим конечные вероятности: $P_1^K = P_2^K = P_4^K = 0; P_3^K = 0,4; P_5^K = 0,6$, что подтверждается результатами пошагового моделирования в табл.6.

Пример 7. Графу на рисунке 4 соответствует система из 7-и ($n = 7$) дифференциальных уравнений 1-го порядка:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = -\lambda_{12}P_1, \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_{12}P_1 - (\lambda_{23} + \lambda_{24})P_2, \\ \frac{dP_3}{dt} = \lambda_{23}P_2, \\ \frac{dP_4}{dt} = \lambda_{24}P_2 - (\lambda_{45} + \lambda_{24})P_4, \\ \frac{dP_5}{dt} = \lambda_{45}P_4, \\ \frac{dP_6}{dt} = \lambda_{46}P_4 - \lambda_{67}P_6, \\ \frac{dP_7}{dt} = \lambda_{67}P_6. \end{cases} \quad (11)$$

Аналогичным образом могут быть получены аналитические выражения $P_j(t), j = 1, \dots, 9$ и для графа на рисунке 5, но они будут иметь громоздкий вид, что делает целесообразным численное решение соответствующего дифференциального уравнения.

Заключение

Таким образом в статье рассмотрена проблема моделирования развития пожара в отсеках судов. Показано, что такие пожары могут принимать динамический характер, и если командой или системой пожаротушения не будет предпринято эффективных мер, то возможен рост ущерба вплоть до прогорания переборок и риска затопления судна.

Для моделирования процессов «пожар-тушение-ущерб» использован математический аппарат цепей Маркова. Представлены несколько цепей в виде графов переходов из одного состояния в последующие. В статье рассмотрены два варианта моделирования – численное пошаговое решение и аналитическое решение системы дифференциальных уравнений, соответствующей

графу переходов, Приведены примеры оценки вероятностей поглощающих состояний, согласующиеся для обоих вариантов моделирования.

Представляется целесообразным проведение дальнейших исследований в части моделирования

пожароопасных ситуаций на разных типах судов – паромов, сухогрузов, контейнеровозов и др. и различными видами энергоустановок и топлива, совершенствования методов моделирования и внесение изменений в соответствующие нормативные документы.

Литература

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р «О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года». – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_402052/ (дата обращения 13.01.2026).
2. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 г. SOLAS-74. Протокол 1988 г. (с изменениями на 24.05.2018). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901765675> (дата обращения 13.01.2026).
3. Постановление Министерства транспорта Российской Федерации от 31.10.2003 №10 «О Правилах пожарной безопасности на морских судах». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456065965> (дата обращения 13.01.2026).
4. Ремнёв А.П. Стратегия и тактика борьбы с пожаром: учеб. пособие. – Новороссийск: РОСМОРФЛОТ, 2004. – 68 с.
5. Теребнев В.В., Артемьев Н.С., Думилин А.И. Противопожарная защита и тушение пожаров на транспорте. Книга-6. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2006. – 404 с.
6. Кемени Д., Снелл Д. Конечные цепи Маркова. – М.: Наука, 1970. – 271 с.
7. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Советское радио, 1972. – 552 с.
8. Таранцев А.А., Поташев Д.А., Скороходов Д.А. Основы управления пожаровзрывобезопасностью паромных автоперевозок при наличии газобаллонных автомобилей // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – Т.4, №1. – С. 279-283.
9. Малыгин И.Г., Таранцев А.А., Королев О.А. О задаче самовосстановления автономных объектов транспортной инфраструктуры // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – Т. 2, № 1(68). – С. 350-357.
10. Таранцев А.А., Маринов М.Л., Коновалов И.Н. О способе моделирования пожаровзрывоопасных ситуаций на пароме и плавучих автостоянках с использованием сетей Маркова // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – Т.1, №1. – С. 270-275.
11. Говорухин В.П., Таранцев Ал.Ал., Соколов Ю.П., Таранцев Ан.Ал. Моделирование взрывопожароопасных процессов на судне при образовании водородно-воздушной смеси // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – Т. 23, № 1(69). – С. 66-71.
12. Таранцев А.А., Поташев Д.А., Куватов В.И. Пожаровзрывобезопасность автомобильных палуб (стоянок) на пароме // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – Т.1, №1. – С. 12-17.
13. Таранцев А.А., Маринов М.Л., Коновалов И.Н. О моделировании экологической и пожарной безопасности морских нефтяных терминалов цепями Маркова // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – Т.3, № 1. – С. 339-346.
14. Таранцев А.А., Лосев М.А., Таранцев Ан.Ал. Арктика, пожары, транспорт: монография. – СПб.: ИПТ РАН, 2021. – 164 с.
15. Колмогоров А.Н. Об аналитических методах в теории вероятностей // Успехи математических наук. – 1938. – № 5. – С. 5-41.

References

1. Order of the Government of the Russian Federation № 3363-r of November 27, 2021 «On the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a Forecast until 2035». – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_402052/ (accessed 13.01.2026).
2. International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974 (SOLAS 74). Protocol of 1988 (as amended on 24.05.2018). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901765675> (accessed 13.01.2026).
3. Resolution of the Ministry of Transport of the Russian Federation № 10 of October 31, 2003 «On Fire Safety Rules for Seagoing Ships». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456065965> (accessed 13.01.2026).
4. Remnev, A.P. Strategy and Tactics of Fire Fighting: Study Guide. – Novorossiysk: ROSMORFLOT, 2004. – 68 p.
5. Terebnev V.V., Artemyev N.S., Dumilin A.I. Fire Protection and Fire Extinguishing in Transport. Book 6. – Moscow: Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, 2006. – 404 p.
6. Kemeny D., Snell D. Finite Markov Chains. – M.: Nauka, 1970. – 271 p.
7. Ventzel E.S. Operations Research. – Moscow: Sovetskoe Radio, 1972. – 552 p.
8. Tarantsev A.A., Potashev D.A., Skorohodov D.A. Fundamentals of management of fire and explosion safety of ferry road transport in the presence of gas-cylinder vehicles // Marine intellectual technologies. – 2022. – Vol.1, №4. – pp. 279-283.
9. Malygin I.G., Tarantsev A.A., Korolev O.A. About the task of self-healing autonomous objects transport infrastructure // Marine intellectual technologies. – 2025. – Vol. 2, № 1(68). – pp. 350-357.
10. Tarantsev A.A., Marinov M.L., Kononov I.N. On the method of modeling fire and explosive situations on ferries and floating parking lots using Markov chains // Marine intellectual technologies. – 2024. – Vol. 1, № 1(63). – pp. 270-275.

11. Govorukhin V.P., Tarantsev A.I., Sokolov Y.P., Tarantsev A.A. Modeling of explosive and fire-hazardous processes on a ship during the formation of a hydrogen-air mixture // Marine intellectual technologies. – 2025. – Vol. 3, № 1(69). – pp. 66-71.
12. Tarantsev A.A., Potashev D.A., Kuvatov V.I. Fire- and Explosion safety car decks (parking) on ferries // Marine intellectual technologies. – 2022. – Vol. 1, № 1. – pp. 12-17.
13. Tarantsev A.A., Marinov M.L., Konovalov I.N. On modeling environmental and fire safety of offshore oil terminals by Markov chains // Marine intellectual technologies. – 2024. – Vol. 3, № 1(65). – pp. 339-346.
14. Tarantsev A.A., Losev M.A., Tarantsev A.A. Arctic, Fires, and Transport: monograph. – St. Petersburg: ITP RAS, 2021. – 164 p.
15. Kolmogorov A.N. On Analytical Methods in Probability Theory // Uspekhi Matematicheskikh Nauk. – 1938. – № 5. – pp. 5–41.

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

Таранцев Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: t__54@mail.ru

Alexander A. Tarantsev, professor, Dr. Sci. (Eng), Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th line, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: t__54@mail.ru

Маринов Марин Любенов, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: marinlomsky@gmail.com

Marin L. Marinov, PhD (Eng.), leading researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th line, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: marinlomsky@gmail.com

Коновалов Иван Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: simulator.ipt@outlook.com

Ivan N. Konovalov, PhD (Eng.), senior researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th line, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: simulator.ipt@outlook.com

Королев Олег Александрович, кандидат технических наук, ученый секретарь, ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: korolev@iptran.ru

Oleg A. Korolev, PhD (Eng.), scientific secretary, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th line, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: korolev@iptran.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 26.01.2026.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.02.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 15.02.2026.

Научная статья

УДК 539.374: 539.224

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.034>

Влияние геометрии алюмотермитной засыпки на распределение интенсивности остаточных напряжений в пластине из хладостойкой стали 20А

Ткачева А.В.¹ nansi.valer@yandex.ru, Абашкин Е.Е.¹ abashkine@mail.ru¹Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН

Аннотация. Работа направлена на построение математической модели наплавления металлического слоя на горизонтальную поверхность стальной пластины. Наплавленный слой получают в результате горения насыпного материала в виде алюмотермитной засыпки, нанесенной на поверхность в форме ленты с определенной полостью и геометрией (высотой и шириной), от чего будет зависеть температура горения. Для пластин с толщинами 0.006, 0.01, 0.015 м. найдены оптимальная геометрия насыпного материала, при которой будет гарантировано проплавление поверхности металла и без образования прожига. Температуру в материале пластины определяется решением уравнения теплопроводности совместно с граничными условиями. В них не рассматривается температура в шлаковой корке и в термитной засыпке, а их наличие моделируется лишь уменьшением отвода тепла от поверхности металла. Для подтверждения эффективности выбранных геометрических параметров насыпного материала решается задача температурных напряжений. Материал пластины принимается упруговязкопластичным, деформации малыми.

Результатом работы является найденная эффективная высота 0.02 м и ширина 0.04 м насыпного материала в виде алюмотермитной засыпки для процесса наплавления металлического слоя на горизонтальную поверхность стальной пластины, толщинами 0.006, 0.01, 0.015 м. Особенность полученного решения демонстрируется тем, что максимальная температура поверхности металла для случаев разными толщинами практически совпадает. При отклонении от эффективной геометрии в сторону увеличения объема алюмотермитной засыпки возрастает интенсивность остаточных напряжений в пластине.

Ключевые слова: наплавка, алюмотермия, температурные напряжения, засыпка, сталь 20А, хладостойкость, низкая температура, экзотермическая реакция, упругость, вязкопластичность.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания ХФИЦ ДВО РАН.

Для цитирования: Ткачева А.В., Абашкин Е.Е. Влияние геометрии алюмотермитной засыпки на распределение интенсивности остаточных напряжений в пластине из хладостойкой стали 20а. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1 часть 1, С. 328—335. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.034.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2026.71.1.034>

Influence of aluminothermite backfill geometry on the distribution of residual stress intensity in a plate of 20A cold-resistant steel

Anastasia V. Tkacheva¹ nansi.valer@yandex.ru, Evgeniy E. Abashkin¹ abashkine@mail.ru¹Institute of Mechanical Science and Metallurgy Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation

Abstract. This work aims to develop a mathematical model for the deposition of a metal layer on the horizontal surface of a steel plate. The deposited layer is produced by combustion of a bulk material in the form of an aluminothermic backfill applied to the surface in the form of a strip with a specific cavity and geometry (height and width), which determines the combustion temperature. For plates with thicknesses of 0.006, 0.01, and 0.015 m, the optimal geometry of the bulk material is determined, which guarantees melting through the metal surface without burn-through. The temperature in the plate material is determined by solving the heat conductivity equation in conjunction with the boundary conditions. These conditions do not consider the temperature in the slag crust or the thermite backfill, and their presence is modeled solely by reducing heat removal from the metal surface. To confirm the effectiveness of the selected geometric parameters of the bulk material, the problem of thermal stresses is solved. The plate material is assumed to be elastic-viscoplastic, with small deformations.

The result of this work is an effective height of 0.02 m and a width of 0.04 m of aluminothermic backfill material for the process of depositing a metal layer on the horizontal surface of a steel plate with thicknesses of 0.006, 0.01, and 0.015 m. The uniqueness of the obtained solution is demonstrated by the fact that the maximum metal surface temperature for different thicknesses is virtually identical. Deviating from the effective geometry by increasing the volume of the aluminothermic backfill increases the intensity of residual stresses in the plate.

Keywords: surfacing, aluminothermy, temperature stresses, backfill, steel 20A, cold resistance, low temperature, exothermic reaction, elasticity, viscoplasticity.

Financial Support: The work was carried out with the financial support of the state assignment of the Kharkiv Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

For citation: Anastasia V. Tkacheva, Evgeniy E. Abashkin Influence of aluminothermite backfill geometry on the distribution of residual stress intensity in a plate of 20a cold-resistant steel. Marine intellectual technologies. 2026. № 1 part 1, P. 328—335. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.034.

Введение

Российская Федерация географически располагается в умеренных широтах и даже в южно-западных регионах температура окружающей среды в зимний период может достигать минус 15 °C. С ростом экономики нашей страны остро возникает потребность в добыче полезных ископаемых, но значительная их часть залегает в северных и арктических районах, включая океанский шельф. При освоении месторождений требуется строительство технических сооружений, нефтегазопроводов и средств транспортировки. Но воздействия отрицательных температур негативно влияют на механические характеристики применяемых материалов в металлоконструкциях при производстве и эксплуатации. Также эта проблема относится и к судостроительному производству, так как транспортировка грузов морем считается самым экономически выгодным способом доставки. В свою очередь, Северный морской путь является кратчайшим маршрутом между европейской частью России и Дальним Востоком. Поэтому востребовано производство крупногабаритных конструкций с высокими проектными требованиями и эксплуатационными параметрами [1-3]. Значительный прорыв в решении этой задачи стала разработка составов сталей, которые обладают хладостойкими качествами, способствующими увеличению сроков работы конструкции в условиях низких климатических температур северных районов.

В ходе изучения хладостойкости материалов очень хорошо себя зарекомендовали низкоуглеродистые конструкционные стали, они активно используются в регионах Крайнего Севера ввиду их относительно небольшой стоимости по сравнению с высоколегированными сталями. Хладостойкая сталь марки 20А получила свое широкое применение при производстве металлоконструкций нефтегазовых комплексов, она относится к хорошо свариваемым материалам со сваркой без ограничений [4].

При эксплуатации конструкции могут подвергаться износу или коррозии поверхности и механическому разрушению, что приводит к выходу из строя технических узлов и оборудования. Транспортные средства, как и места нефтегазовых комплексов и разработок полезных ископаемых могут находиться на большом удалении от логистических центров, с труднодоступными местами без электрификации, это может приводить к серьёзным авариям и к возникновению длительных простоев процесса добычи и транспортировки, поэтому крайне востребован оперативный автономный способ ремонта и восстановления повреждённых деталей.

Для решения этой задачи требуется найти новый подход к процессу наплавки, позволяющий получать наплавленный слой металла на поверхности восстанавливаемой или ремонтируемой детали без использования дополнительных энергетических ресурсов

(электроэнергии, горючих газов). Данный процесс можно осуществить благодаря применению алюмотермитных композиций, состоящих из смеси фракций металлической окалины и алюминиевого порошка с добавлением легирующих компонентов. Основной компонент – железная окалина, которая является отходом в металлургии. При инициировании алюмотермитного порошка начинается окислительно-восстановительная реакция, которая протекает с выделением значительного количества тепла [5-7].

Основными отраслями, использующими порошки алюмотермитной композиции являются: сварочное и литейное производство. В литейном производстве применяется алюмотермитная шихта, для обогрева прибылей черного и цветного литья, модифицирования и легирования сплавов [8 – 10]. Значительную долю применения алюмотермитной сварки занимает изготовление неразъемных соединений в стык железнодорожных рельсов и термитно – муфельная сварка электропроводящих проводов. Данная технология зарекомендовала себя, как мобильный и эффективный способ соединения конструкций [11-13].

Для моделирования технологического процесса рассмотрим получение наплавляемого слоя путем нанесения алюмотермитного порошка с разными геометрическими параметрами на поверхность пластины из хладостойкой стали 20А. Состав при воспламенении запускает экзотермическую реакцию, в результате чего образуется расплавленный металл, формирующий наплавленный слой на поверхность пластины. Скорость горения алюмотермитного порошка возможно регулировать размером фракции порошка и добавлением различных присадочных материалов в его состав. Для того чтобы расплавленный металл не стекал с горизонтальной поверхности используют стенки, либо прорезают углубления в виде дорожек в пластине.

Существуют работы, посвященные горению разного рода порошковых смесей [14-16] с выделением тепла, но в настоящей статье сам процесс горения не рассматривается, потому что в химической реакции рассчитывается только тепло которое будет воздействовать на материал пластины.

В результате алюмотермитной реакции происходит восстановление железа 55-70 % от массы алюмотермитного порошка, а остаток образует шлаковую корку, которая обладает хорошими теплоизоляционными свойствами, в результате чего остывание наплавляемого слоя происходит медленней, чем при обычном наплавлении металла, без образования шлаковой корки. Понижение температурного градиента уменьшает скорость кристаллизации и способствует снижению остаточных деформаций и напряжений.

Математическое моделирование процесса наплавки с учетом геометрических параметров и

теплофизических свойств позволяет оптимизировать изучаемые технологии, не прибегая к длительным и дорогостоящим экспериментам.

Работа направлена на исследование процесса наплавления металлического слоя на горизонтальную поверхность стальной пластины с использованием насыпного материала в виде алюмотермитной засыпки. Целью является определение геометрии насыпного слоя для разных толщин 0.006, 0.01, 0.015 м пластин из хладостойкой стали 20А, при которой будет гарантированно проплавление поверхности металла и без образования сквозного прожига.

Моделирование технологического процесса

Алюмотермитная засыпка весом m равномерной толщиной h наносится на горизонтальную поверхность стальной пластины. Длина пластины совпадает с длиной засыпки l_1 , а ширина засыпки l_2 и пластины l_3 . На рис. 1 показана схема процесса. Воспламеняясь, засыпка горит со скоростью V , в результате образуется слой расплавленного металла толщиной $0,5h$ сходный по своему составу с основным металлом и шлаковая корка, которая в последствии убирается. Предполагаем, что расплавленный металл, растекаясь по пластине не будет. Распределение тепла в пластине описывается уравнением теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) \quad (1)$$

λ – теплопроводность Вт/(м°C), c – удельная теплоемкость Дж/(кг°C), ρ – плотность кг/м³. Теплом от деформации в уравнении (2) пренебрегаем, поэтому поставленная задача является не связной.

В процессе термохимических реакций между алюминием и оксидами железа – выделяется теплота, которая для окислительно – восстановительной реакции с оксидом железа имеет значения [17,18]:

$$3Fe_3O_4 + 8Al = 4Al_2O_3 + 9Fe + 723,6 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$$

700,65	215,76	407,72	502,65
молекулярный вес			
76,45 %	23,54 %	44,78 %	55,21 %
процентное соотношение			

Если 215,76 грамм – молекулы алюминия в процессе реакции с оксидом железа выделяют 723,6 ккал/моль, а 23,54 % А1 (0,2354 – процентное содержание алюминия в весовой единице алюмотермита) будут выделять x калорий теплоты, то: $x = \frac{Q \cdot \phi_{Al} \cdot 1000}{m_m(Al)}$, где x – количество тепла

выделенного алюминием при сгорании 1 килограмма алюмотермита, ккал/кг; Q – тепловой эффект реакции, ккал/моль; ϕ_{Al} – процентное содержание А1 в весовой единице алюмотермита; $m_m(Al)$ – молекулярный вес.

То есть при сгорании 1 килограмма алюмотермита алюминием выделяется 790 ккал/кг, но восстановление железа происходит с эндотермической реакцией, часть энергии выделяемой при сгорании алюминия затрачивается на преобразование окиси железа Fe_3O_4 в закись железа FeO , а последняя, теряя кислород, образует чистое железо. Чтобы найти теплотворную способность алюмотермита необходимо рассчитать количество тепла, затрачиваемое на восстановление железа: $y = (\lambda_{Fe} \cdot \phi_{Fe}) + (\lambda_{Al_2O_3} \cdot \phi_{Al_2O_3})$, где y – количество тепла затрачиваемого на восстановление железа при сгорании 1 килограмма алюмотермита, ккал/кг; λ_{Fe} – скрытая теплота плавления железа, $\lambda_{Fe} = 65$, ккал/кг; $\lambda_{Al_2O_3}$ – скрытая теплота плавления оксида алюминия, $\lambda_{Al_2O_3} = 49$, ккал/кг; ϕ_{Fe} и $\phi_{Al_2O_3}$ – процентное содержание железа и оксида алюминия в весовой единице алюмотермита.

$$y = 57,8.$$

Теплотворную способность алюмотермита найдем по формуле:

$$Q_{T.T} = x - y,$$

где $Q_{T.T}$ – теплотворная способность алюмотермита, ккал/кг; x – количество тепла, выделенного алюминием при сгорании 1 килограмма алюмотермита, ккал/кг; y – количество тепла, затрачиваемого на восстановление железа при сгорании 1 килограмма алюмотермита, ккал/кг. $Q_{T.T} = 732,2$ ккал/кг.

Если перевести теплотворную способность термита в кДж/кг, то она составит $Q_T = 3063,5$ кДж/кг, тогда тепловой поток, проходящий через поверхность пластины $q = \rho l_2 h V Q_T$ кДж/с. Для решения температурной задачи запишем граничные условия (рис. 1):

в области контакта пластины с ядром протекания алюмотермитной реакции S_1 ($S_1 = l_2 \times 0.001$) $-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x_3} \right) \Big|_{S_1} = q$.

В области зарождения шлаковой корки S_2 $-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x_3} \right) \Big|_{S_2} = k_1(T_w - T^e)$.

В области контакта пластины с термитной засыпкой S_3 : $-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x_3} \right) \Big|_{S_3} = k_2(T_w - T^e)$.

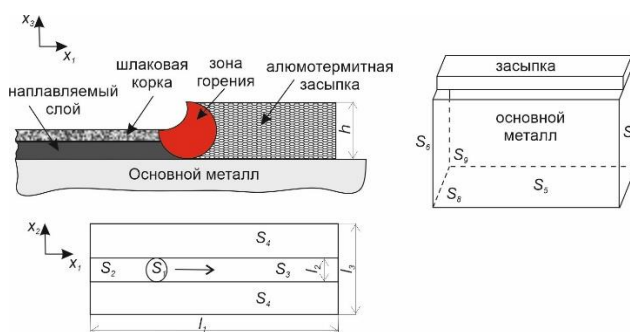


Рис. 1. Схема задачи

На свободных поверхностях S_i $i = 4 \dots 9$ $\pm \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_w = k_3(T_w - T^e) + k_4 k_5 ((T^e)^4 - T^4)$, где S_i $i = 1 \dots 9$ поверхности изображенные на рис. 1, $\vec{n}$ – вектор нормали к поверхности, k_1, k_2, k_3 – коэффициенты теплообмена между окружающей средой и металлом. k_1 занижен по сравнению с коэффициентами k_2 и k_3 поскольку шлаковая корка обладает теплоизолирующими свойствами, $k_2 < k_3$ засыпка уменьшает теплообмен между металлом и окружающей средой. k_4 – приведенная степень черноты; $k_5 = 5.669 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана Вт/(м²·К⁴). Знак перед λ зависит от направления теплового потока относительно поверхности и координатной осяю, T_w – температура на поверхности пластины.

В температурной задаче, как видно из поставленных выше условий, не рассчитывается температура в шлаковой корке и в термитной засыпке, а их наличие моделируется лишь уменьшением отвода тепла от поверхности металла. Это сделано, чтобы не запутать читателя. Напряжения и деформации отыскиваются только в материале пластины, поэтому температуру исследовать стоит только в ней.

Температурная задача (2)-(6) с начальными условиями $T = T_0$ решается отдельно от задачи механической задачи (1) численно.

Механическая задача заключается в решении системы замкнутых уравнений, состоящей из сопоставляющих законов:

$$\begin{aligned} \mathbf{d} &= \mathbf{e} + \mathbf{p} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + \nabla^T \mathbf{u}); \quad \boldsymbol{\sigma} = (\lambda \text{tr} \boldsymbol{\varepsilon} - 3\alpha T_0 K \boldsymbol{\theta}) \mathbf{I} + \\ &2\mu \boldsymbol{\varepsilon}; \quad \varphi \geq 0 \quad \boldsymbol{\varepsilon}^p = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \varphi \frac{\partial f(\boldsymbol{\sigma}, k)}{\partial \boldsymbol{\sigma}}; \\ &\sqrt{\frac{3}{2}(\boldsymbol{\tau} - \zeta \boldsymbol{\varepsilon}^p) \cdot (\boldsymbol{\tau} - \zeta \boldsymbol{\varepsilon}^p)} = k(T); \\ &\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\sigma} - \text{tr} \boldsymbol{\sigma} \mathbf{I}; \\ &\text{div} \boldsymbol{\sigma} = 0. \end{aligned}$$

Где $\mathbf{d}$ – деформации являются малыми, состоящими из упругих $\mathbf{e}$ и пластических $\mathbf{p}$, $\mathbf{u}$ – вектор перемещений, α – коэффициенты линейного расширения, $\mathbf{I}$ – единичный тензор второго ранга, $\boldsymbol{\tau}$

– девиатор тензора напряжений, $\zeta = \text{const}$ – параметр вязкости упруговязкопластического материала; двоеточием « $\cdot$ » обозначена операция полной свертки тензоров второго ранга

$$E(x, y, z, t) = E_p - (E_p - E_0)\theta(x, y, z, t), \quad v(x, y, z, t) = 0.5 - (0.5 - v_0)\theta(x, y, z, t),$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \theta = (T_p - T)(T_p - T_0)^{-1}$$

где E_0 – модуль Юнга при комнатной температуре T_0 , E_p – при температуре плавления T_p , ν_0 – коэффициент Пуассона при комнатной температуре.

Предел текучести $k = k(T)$ зависит от температуры

$$k = k(T) = k_0(T_r - T)(T_r - T_0)^{-1} \quad \text{при } T < T_r$$

$$k = k_0^{-1} \quad \text{при } T \geq T_r$$

Здесь T_r – температура, при которой предел текучести стремится к нулю. Для сталей она составляет $T_r = 600^\circ\text{C}$.

В качестве граничных условий принимаются свободные от нормальных и касательных напряжений внешние поверхности пластины. Подробно о нахождении необратимых деформаций описано в работе [19].

Результаты численных расчетов

Физико-механические свойства пластины шириной 0.1м, длиной 0.5м, выполненной из стали марки 20А: $\alpha = 12.3 \cdot 10^{-6}$ (1/°C); $\rho = 7859$ (кг/м³); $\lambda = 52$ (Вт/(м·°C)); $c = 486$ (Дж/(кг·°C)); $E_0 = 213$ ГПа; $E_p = 0.3 E_0$; $\nu_0 = 0.25$; $k_0 = 390$ МПа. [20] Скорость горения 0.008 кг/с. Коэффициенты теплообмена между окружающей средой и металлом k_1, k_2, k_3 равны соответственно: 2, 7 и 10 Вт/(м²·К).

Для определения оптимальной геометрии насыпного слоя в исследовании высота принималась равной 0.01, 0.02, 0.03 м, ширина – 0.02, 0.03, 0.04 м, для разных толщин пластин (0.006, 0.01, 0.015 м). На рисунках 2-3 показано распределение температуры на поверхности пластины вдоль горения алюмотермитной засыпки по линии симметрии в некоторый момент времени.

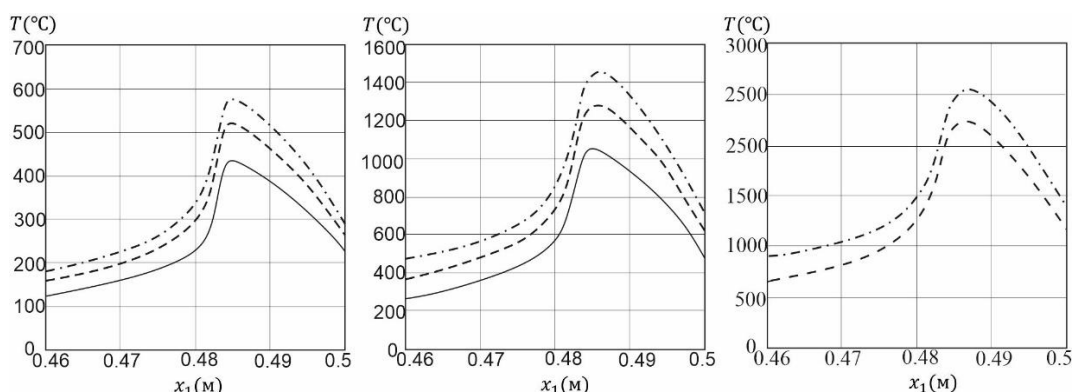


Рис.2. Распределение температуры в некоторый промежуток времени на поверхности пластины вдоль горения алюмотермитной засыпки по линии симметрии, толщиной 0.01м, высотой засыпки h : (а) – 0.01м; (б) – 0.02 м, (в) – 0.03 м; Штрих-пунктирной линией обозначена ширина засыпки (l_2) 0.04м, пунктир – 0.03 м, сплошной – 0.02 м.

Как показали расчеты для рассматриваемых толщин высоты засыпки 0.01м недостаточно для проплавления основного металла (рис.2 а), а при высоте – 0.03 м (рис.2 в) происходит перегрев, поэтому оптимальная геометрия является $h=0.02$ м, $l_2=0.04$ м (рис. 2 б). Особо хочется отметить тот факт, что максимальная температура на

поверхностном слое для пластин с исследуемыми толщинами (0.006, 0.01 и 0.015) одинакова, что показана на рисунке 3. Исследуя распределение температуры в пластинах разных толщин при горении алюмотермитной засыпки рисунок 4, можно сказать, что из-за распространения температуры вглубь металла на поверхности

пластины зона высокой температуры уменьшается с увеличением толщины пластины.

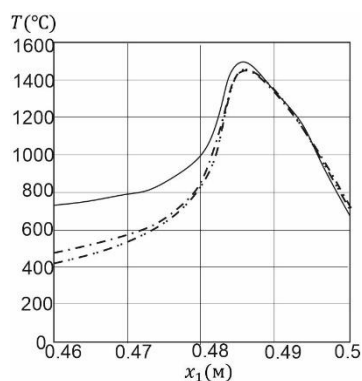


Рис.3. Распределение температуры в некоторый промежуток времени на поверхности вдоль горения алюмотермитной засыпки по линии симметрии пластины, ширина засыпки 0.04 м, высота 0.02 м, сплошная линия обозначена для толщины пластины 0.006 м; штрихпунктирной – 0.01 м, штрихпунктирной с двумя точками – 0.015 м.

Для определения оптимальной геометрии насыпного слоя в исследовании высота принималась равной 0.01, 0.02, 0.03 м, ширина – 0.02, 0.03, 0.04 м, для разных толщин пластин (0.006, 0.01, 0.015 м). На рисунках 2-3 показано распределение температуры на поверхности пластины вдоль горения алюмотермитной засыпки по линии симметрии в некоторый момент времени.

Как показали расчеты для рассматриваемых толщин высоты засыпки 0.01 м недостаточно для проплавления основного металла (рис.2 а), а при высоте – 0.03 м (рис.2 в) происходит перегрев, поэтому оптимальная геометрия является $h=0.02$ м, $l_2=0.04$ м (рис. 2 б). Особо хочется отметить тот факт, что максимальная температура на поверхностном слое для пластин с исследуемыми толщинами (0.006, 0.01 и 0.015) одинакова, что показана на рисунке 3. Исследуя распределение температуры в пластинах разных толщин при горении алюмотермитной засыпки рисунок 4, можно сказать, что из-за распространения температуры вглубь металла на поверхности пластины зона высокой температуры уменьшается с увеличением толщины пластины.

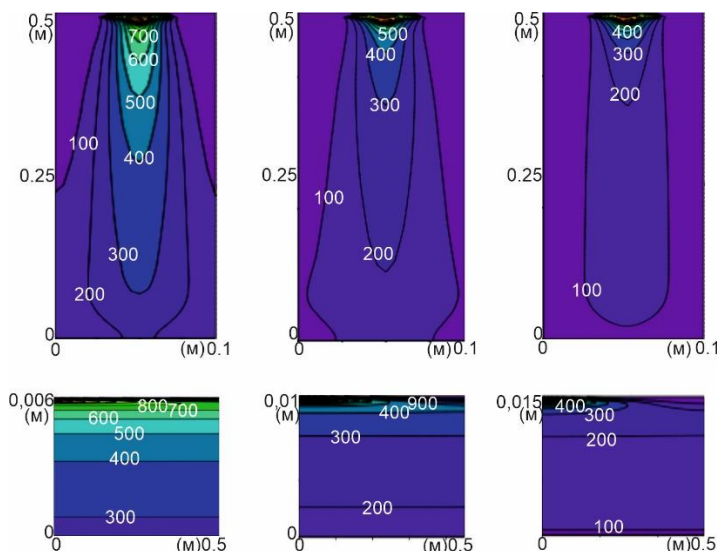


Рис.4. Распределение температуры в материале пластины толщиной: а) – 0.006м; б) – 0.01 м; в) – 0.015 м, возникшее в некоторый промежуток времени в результате горения алюмотермитной засыпки, $h=0.02$ м, $l_2=0.04$ м.

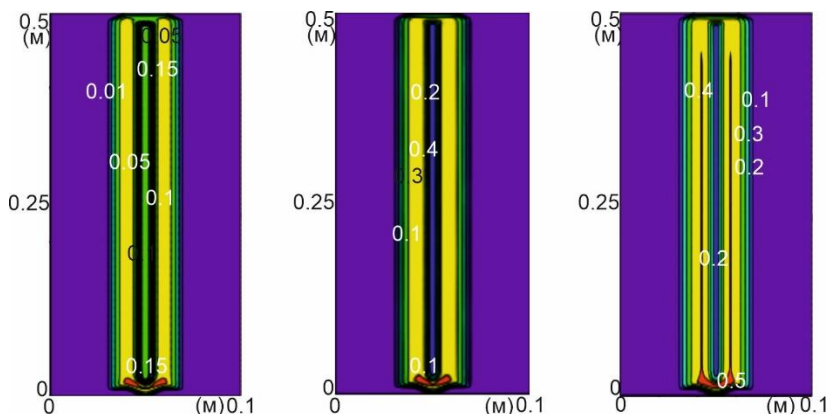


Рис.5. Распределение интенсивности остаточных напряжений Σ / k_0 на поверхности пластин с толщиной: а) – 0.006м; б) – 0.01 м; в) – 0.015 м. Геометрия засыпки $h=0.02$ м, $l_2=0.04$ м.

Анализируя полученные распределения температур, определяется эффективная геометрия засыпки, при которой произойдёт проплавление материала без перегрева. Этой геометрией является $h=0.02$ м, $l_2=0.04$ м. Для доказательства ее оптимальности рассмотрим

интенсивность остаточных напряжений $\Sigma = \sqrt{\frac{3}{2} \tau \cdot \tau}$ в материале пластин разной толщины. На рисунках 5 - 6 изображены распределения интенсивности остаточных напряжений в пластинах исследуемых

толщин (0.006, 0.01 и 0.015). Как видно из рисунков, значения интенсивности остаточных напряжений не большие. В основном концентрация Σ прослеживается на поверхностном слое пластины и не превышает $0.4k_0$. При удалении от средней линии формируется локальная область с повышенным уровнем напряжений. Это связано с тем, что здесь наиболее выражен температурный перепад (зона термического влияния).

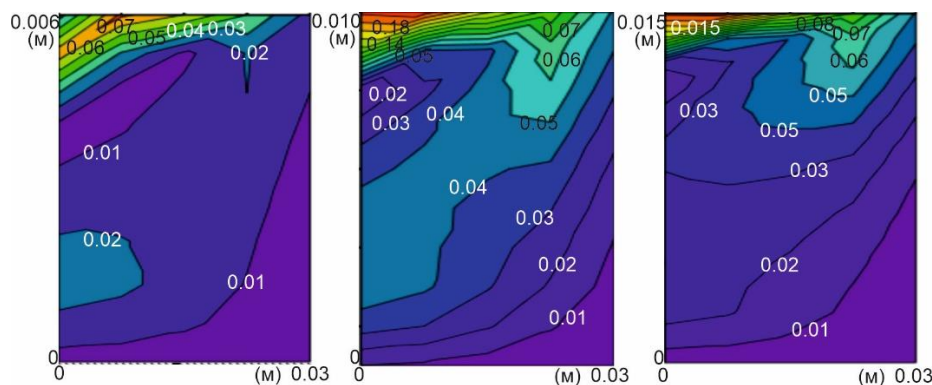


Рис. 6. Распределение интенсивности остаточных напряжений в середине пластины поперёк средней линии. Толщина пластины: а) – 0.006 м; б) – 0.01 м; в) – 0.015 м. Геометрия засыпки $h=0.02$ м, $l_2=0.04$ м.

Если в качестве примера просмотреть распределение интенсивности остаточных напряжений рисунок 7, образованных в случае, когда геометрия засыпки не является оптимальной ($h=0.03$ м, $l_2=0.03$ м) т.е. осуществляется, перегрев материала пластины, то Σ достигают критических значений.

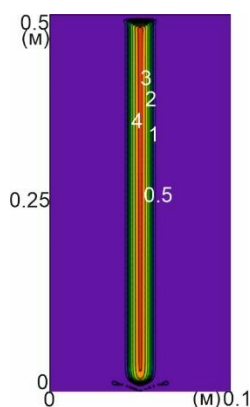


Рис. 7. Распределение интенсивности остаточных напряжений Σ/k_0 на поверхности пластин с толщиной 0.01 м. Геометрия засыпки $h=0.03$ м, $l_2=0.03$ м.

Заключение

В настоящей работе определена оптимальная геометрия насыпного материала в виде алюмотермитной засыпки для процесса наплавления металлического слоя на горизонтальную поверхность пластины из хладостойкой стали 20А. При соблюдении этой геометрия высотой 0.02 м и шириной 0.04 м в ходе упомянутой выше технологической операции обеспечивается проплавление верхнего слоя пластин различной толщиной от 0.006 м до 0.015 м без образования прожига материала и наименьшим уровнем интенсивности остаточных напряжений. Особенность полученного решения демонстрируется тем, что максимальная температура поверхности металла для случаев разными толщинами практически совпадает. При отклонении от оптимальной геометрии в сторону увеличения объёма засыпки интенсивность остаточных напряжений в материале пластины возрастает, что подтверждается сравнением результатов, изображённых на рисунке 5 б с рисунком 7.

Литература

1. Sung-Woong Choi., Doo-Hwan Park., Jae-Myung Lee. Charpy impact properties of stainless steel weldment in liquefied natural gas pipelines: Effect of low temperatures // Materials & Design. 2015. Vol 65. pp. 914-922 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.085>
2. Филин В.Ю. Контроль качества сталей для крупногабаритных сварных конструкций арктического шельфа. Применение российских и зарубежных требований // Вопросы материаловедения. 2019. № 2 (98). С. 136-153
3. Структура и механические свойства судостроительной стали, полученной методом прямого лазерного выращивания и горячей прокатки / Р.В. Мендагалиев [и др.] // Вопросы материаловедения. 2023. № 3 (115). С. 17-26.

4. Зазян А.С., Терлецкий С.В. Опыт промышленного освоения технологии производства стали марки 20А для горячедеформированных бесшовных труб повышенной коррозионной стойкости и хладостойкости. // Литье и металлургия. 2013. № 3S (72). С. 58-62.
5. Влияние нагрева термитной шихты на структуру и свойства слитка интерметаллидного сплава на основе Fe-Al, получаемого экзотермическим переплавом / С.Г. Жилин [и др.] // Металлург. 2024. № 11. С. 94-101.
6. Барсукова Н.В., Попов А.В., Комаров О.Н. Эволюция структуры и свойств железоуглеродистых сплавов, получаемых алюмотермией при дифференциации фракционного состава шихтовых материалов. // Металлург. 2024. № 11. С. 102-112.
7. E. E. Abashkin, S. G. Zhilin, and O. N. Komarov .Structure formation of the heat-affected zone of the permanent joint made by the automatic submerged arc welding with the use of the flux-cored wire with thermite filler // AIP Conference Proceedings. Proceedings of the international conference. 2019. C. 020001.
8. Новохацкий В.А. и др. Малоотходная технология производства стальных отливок с экзотермическими прибылями / В.А.Новохацкий, А.А.Жуков, Ю.И.Макарычев. - М.: Машиностроение. 1986. 64 с.
9. Утепление прибыльной части слитков спокойной стали эффективной экзотермической смесью / В. Ф. Поляков [и др.] // Сталь. 1991, № 10. С. 21-24.
10. Ежов В. Л., Кузьмин Ю. Д. Технология получения отливок с экзотермическим обогревом прибыльной части // Тяж. машиностр. 1993. № 3. С. 29-30.
11. Сидоров Э.С. Совершенствование производственного процесса термитной сварки рельсов // Вестник сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1. С. 76-85.
12. Каракич Е.А., Самборук А.Р., Майдан Д.А. Термитная сварка // Современные материалы, техника и технологии 2021. № 1. С. 63-67.
13. Motlagh E. B., Khaki J. V, Sabzevar M.H. Welding of aluminum alloys through thermite like reactions in Al–CuO–Ni system // Materials Chemistry and Physics. 2012. № 133. pp. 757-763. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.01.086>
14. Shkadinskiia K. G., Ozerkovskayab N. I., Krishenikb P. M. Quasi-hydrostatic model of the combustion of compositions forming molten reaction products in the presence of centrifugal forces// Russian Journal of Physical Chemistry. 2018. Vol. 12, № 2. pp. 219–224.
15. Shkadinsky K. G., Ozerkovskaya N. I., Krishenik P. M. Mathematical modeling of phase separation in three-phase melt formed behind the combustion wave IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 558. pp. 012046. doi:10.1088/1757-899X/558/1/012046
16. Шульц Д. С., Крайнов А. Ю. Математическое моделирование СВС процесса в гетерогенных реагирующих порошковых смесях // Компьютерные исследования и моделирование. 2011. Т. 3, № 2. С. 147–153.
17. Малкин Б.В., Воробьев А.А. Термитная сварка. М.: 1963, 102с.
18. Клячкин Я.Л. Термитная сварка: Справочные материалы для сварщиков. -М.: Машгиз. 1951. 83 с.
19. Буренин А.А., Ткачева А.В. Задача Гадолина о процессе сборки двухслойной предварительно напряженной трубы // ПМТФ. 2023. Т. 64, №5. С. 225-240.
20. Зубченко А.С., Каширский Ю.В., Дегтярев А.Ф. Марочник сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 2015. 524 с.

References

1. Sung-Woong Choi., Doo-Hwan Park., Jae-Myung Lee. Charpy impact properties of stainless steel weldment in liquefied natural gas pipelines: Effect of low temperatures // Materials & Design. 2015. Vol 65. pp. 914-922 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.085>
2. Filin V. Yu. Quality control of steels for large-sized welded structures of the Arctic shelf. Application of Russian and foreign requirements // Voprosy Materialovedeniya. 2019. No. 2 (98). pp. 136-153
3. Structure and mechanical properties of shipbuilding steel obtained by direct laser growth and hot rolling / R.V. Mendagaliev [et al.] // Voprosy Materialovedeniya. 2023. No. 3 (115). pp. 17-26.
4. Zazyan A.S., Terletskiy S.V. Experience in industrial development of the technology for the production of grade 20A steel for hot-deformed seamless pipes with increased corrosion resistance and cold resistance. // Casting and metallurgy. 2013. No. 3S (72). pp. 58-62.
5. The effect of heating thermite charge on the structure and properties of an ingot of Fe-Al-based intermetallic alloy obtained by exothermic remelting / S.G. Zhilin [et al.] // Metallurgist. 2024. No. 11. pp. 94-101.
6. Barsukova N.V., Popov A.V., Komarov O.N. Evolution of the structure and properties of iron-carbon alloys obtained by aluminothermy during differentiation of the fractional composition of charge materials. // Metallurgist. 2024. No. 11. pp. 102-112.
7. E. E. Abashkin, S. G. Zhilin, and O. N. Komarov .Structure formation of the heat-affected zone of the permanent joint made by the automatic submerged arc welding with the use of the flux-cored wire with thermite filler // AIP Conference Proceedings. Proceedings of the international conference. 2019. C. 020001.
8. Novokhatsky V.A. et al. Low-waste technology for the production of steel castings with exothermic risers / V.A. Novokhatsky, A.A. Zhukov, Yu.I. Makarychev. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 64 p.
9. Thermal insulation of the riser part of killed steel ingots with an effective exothermic mixture / V.F. Polyakov [et al.] // Steel. 1991, No. 10. pp. 21-24.
10. Yezhov V.L., Kuzmin Yu.D. Technology for producing castings with exothermic heating of the riser part // Heavy. mashinostr. 1993, No. 3. pp. 29-30.
11. Sidorov E.S. Improvement of the production process of thermite welding of rails // Bulletin of the Siberian State Transport University. 2022. No. 1. pp. 76-85.

12. Karakich E.A., Samboruk A.R., Maidan D.A. Thermite welding // Modern materials, engineering and technology – 2021. No. 1. pp. 63-67.
13. Motlagh E.B., Khaki J.V., Sabzevar M.H. Welding of aluminum alloys through thermite-like reactions in the Al–CuO–Ni system // Materials Chemistry and Physics. 2012. No. 133. pp. 757-763. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.01.086>
14. Shkadinskiia K. G., Ozerkovskaya N. I., Krishenikb P. M. Quasi-hydrostatic model of the combustion of compositions forming molten reaction products in the presence of centrifugal forces // Russian Journal of Physical Chemistry. 2018. Vol. 12, No. 2. pp. 219–224.
15. Shkadinsky K. G., Ozerkovskaya N. I., Krishenik P. M. Mathematical modeling of phase separation in three-phase melt formed behind the combustion wave IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. No. 558. pp. 012046. doi:10.1088/1757-899X/558/1/012046
16. Shultz D. S., Kraynov A. Yu. Mathematical modeling of the SHS process in heterogeneous reactive powder mixtures // Computer research and modeling. 2011. Vol. 3, No. 2. pp. 147–153.
17. Malkin B. V., Vorobyov A. A. Thermite welding. Moscow 1963, 102 p.
18. Klyachkin Ya. L. Thermite welding: Reference materials for welders. - Moscow: Mashgiz. 1951. 83 p.
19. Burenin A. A., Tkacheva A. V. Gadolin's Problem on the Assembly Process of a Two-Layer Prestressed Pipe // PMTF. 2023. Vol. 64, No. 5. Pp. 225-240.
20. Zubchenko A.S., Kashirskiy Yu.V., Degtyarev A.F. Steel and Alloy Brand Book. – Moscow: Mashinostroenie, 2015. 524 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 О Б АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ткачева Анастасия Валерьевна, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, 681005, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, дом 1, e-mail: nansi.valer@yandex.ru

Anastasia V. Tkacheva, Ph.D. (Phys & Math), Senior Researcher, Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Metallurgov Street, Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Krai, 681005, Russia, e-mail: nansi.valer@yandex.ru

Абашкин Евгений Евгеньевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, 681005, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, дом 1, e-mail: abashkine@mail.ru

Evgeniy E. Abashkin, Ph.D. (Eng), Professor, Senior Researcher, Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Metallurgov Street, Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Krai, 681005, Russia, e-mail: abashkine@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.01.2026.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.01.2026.

Принята к публикации/accepted for publication 10.02.2026.



**Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173
190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3
e-mail: mit-journal@mail.ru http://morintex.ru

**ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ
НАУЧНОГО ЖУРНАЛА
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов:

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи в WORD и PDF, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта и инструкция размещены на сайте **www.morintex.ru**
3. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
4. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
5. Рубрикатор в WORD.

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) должны быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу **mit-journal@mail.ru** (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта <http://morintex.ru> из раздела «для авторов».

На страницах журнала публикуются НОВЫЕ научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом должен быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

С 2026г. стоимость публикации 22000 рублей (НДС не облагается) по выставляемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

**Главный редактор научного журнала
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ

Гайкович А.И. Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

Караев Р.Н., Разуваев В.Н., Фрумен А.И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П.А. Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**

Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Теория систем автоматического управления техническими средствами кораблей. Курс лекций – СПб.: НИЦ «Моринтех», 2022. 300 стр.

В курсе лекций рассматриваются основные вопросы теории систем автоматического управления линейных, нелинейных, импульсных, цифровых, адаптивных и оптимальных, основанный на дифференциальных уравнениях и передаточных функциях, способствующих физическому пониманию процессов, происходящих в системах автоматического управления, для дальнейшего усвоения особенностей применения матричных уравнений для исследования устойчивости и качества современных цифровых систем автоматического управления.

Есть в продаже: **цена 1800 руб. + пересылка**