MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

120 130 140 150 160 170 180 190 200 Hz

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

№ 3 Часть 1 2026
№ 3 Part 1 2026

НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА LIBRARY.RU

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

THOMSON REUTERS WEB OF KNOWLEDGE

ULRICH'S KHOWLEDGEBASE

Morskie intellektual'nye tehnologii



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

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 3 часть 1 2026 Сквозной номер 73
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. Главный редактор: Никитин Н.В. д.т.н., профессор.

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, с 2014г полные выпуски журнала размещены на сайте научной электронной библиотеки https://elibrary.ru в открытом доступе. Стоимость публикации в 2026г. 22000 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.

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 редакции: mit-journal@mail.ru)

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

Регистрационные номера ПИ № ФС77-32382 от 09.06.2008, Эл № ФС77-33245 от 19.09.2008 выданы Роскомнадзором.

Член Ассоциации научных редакторов и издателей.

Адреса учередителя, издателя, редакции: 190121 г.Санкт-Петербург, ул Лоцманская д.3 литера А.

Тел.+7 (812) 513-04-51, бесплатный звонок по России 8 800 201 3897, e-mai издателя: morintex_spb@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 ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ» 194356, г. Санкт-Петербург, пр. Луначарского, д.1, корпус 2, литера А, помещение 6-Н.

Тираж 50 экз. Выход в свет 03.09.2026.

Цена свободная.

© ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ», 2026

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

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 3 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 owledgebase. Chief Editor Nikolay V. Nikitin

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 ш 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 Intellectual Technologies" https://morintex.ru.
Registration number**:** ПИ № ФС77-32382 of 09.06.2008, Эл № ФС77-33245 of 19.09.2008 issued by Roskomnadzor.
Member of Association of science editors and publishers.
Address: Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, Phone +7 (812) 513-04-51, e-mail Founder: morintex_spb@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 Intellectual Technologies".

Authors and advertises 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. The print run is 50 copies. Release date: 03.09.2026

© 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., 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
Юй Синьянь к.т.н., доцент, Харбинский Инженерный университет, Китайская народная республика

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
Огай С.А., 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

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

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
Viktoriia 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.
Yu Xinyan PhD (Eng.), Associate professor,
Harbin Engineering University, People's Republic of China.

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
- **Сазонов Кирилл Евгеньевич,** доктор технических наук, Крыловский государственный научный центр
- **Кириченко Александр Викторович**, доктор технических наук, профессор, ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова
- **Гордеев Николай Николаевич,** кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Искандеров Юрий Марсович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский Федеральный Исследовательский Центр Российской академии наук
- **Надежкин Андрей Вениаминович,** доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Дологлонян Андрей Вартазарович**, кандидат технических наук, доцент, Институт природно-технических систем Российской Федерации
- **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
- **Родионов Александр Александрович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Петров Олег 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
- **Столяров Сергей Павлович**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Филатов Виктор Иванович,** кандидат технических наук, доцент, государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова
- **Альбаев Данил Айдарович**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Ксенофонтов Юрий Геннадьевич,** кандидат технических наук, доцент, ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова
- **Крыжевич Геннадий Брониславович**, доктор технических наук, профессор, "Крыловский государственный научный центр
- **Хрунков Сергей Николаевич**, доктор технических наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
- **Каминский Валерий Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук

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
- **Aleksandr V. Kirichenko,** Dr. Sci. (Eng), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Nikolai N. Gordeev**, Ph.D. (Eng), Associate professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Yury M. Iskanderov**, Dr.Sci. (Eng), professor, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences
- **Kirill E. Sazonov,** Dr. Sci. (Eng), Krylov State Research Centre
- **Andrey V. Nadezkin,** Dr. Sci. (Eng), Professor, Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi
- **Andrey V. Dologlonyan**, Ph.D. (Eng), assistant professor, Institute of nature and technical systems
- **Galina V. German,** Dr. Sci. (Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Eugene K. Samarov**, Dr. Sci. (Eng.), Saint-Petersburg state marine technical university
- **Aleksandr A. Rodionov,** Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Oleg N. Petrov**, Ph.D. (Eng), Associate professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Alexander A. Tarantsev,** Dr.Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Sergei P. Stoljarov**, Ph.D. (Eng), Associate professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Viktor I. Filatov**, Ph.D. (Eng.), assistant professor, Admiral Ushakov Maritime State University
- **Danil A. Al'baev,** PhD (Eng), associate professor of department of theory of the ship, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Yurii G. Ksenofontov,** PhD (Eng), associate professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Gennadiy B. Kryzhevich**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Krylov State Research Center
- **Sergey N. Khrunkov,** Dr.Sci. (Eng), Associate Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
- **Valery Yu. Kaminsky**, PhD (Eng), assistant professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of science

СОДЕРЖАНИЕ стр.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

Мизгирев Д.С., Власов В.Н., Власов Д.В., Решняк В.И. Проблема совершенствования судовых систем очистки балластных вод в соответствии с международными требованиями…… 13

Подкорытов П.Д., Овчинников К.Д. Использование методов имитационного моделирования для решения задачи обеспечения контейнерных перевозок между СПб и Калининградом…… 22

Алиханов О.Э. Обоснование управляемых параметров цифрового информационного моделирования, влияющих на снижение стоимости при реализации проектов морских транспортных судов…… 31

Антропова М.В. Сравнительный анализ стратегий позднего и раннего цикла Миллера в обеспечении топливной гибкости судовых газовых двигателей…….. 36

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Земляк В.Л., Козин В.М. Движение погруженного тела под ледяным покровом, ослабленным поперечной трещиной……. 46

Козин В.М. Встречное движение нагрузок по ледяной переправе…….. 54

Русановский С.А., Грамотин Р.И., Музыка М.М., Платоненков С.В. Разработка автоматизированной системы измерения и обработки углов кренования судна…… 59

Альбаев Д.А., Семенова В.Ю. Определение дифракционных сил второго порядка, обусловленных суммой частот, возникающих в условии бихроматического волнения на основании трехмерной потенциальной теории…… 66

Чебан Е.Ю., Кожевников А.И., Никущенко Д.В., Ермаков С.А. Численное исследование гидродинамики крупнотоннажных катамаранов для внутренних водных путей…….. 75

Семенова В.Ю., Динцер А.И. Определение коэффициента демпфирования численным методом для расчета амплитудно-частотных характеристик бортовой качки первого и второго порядка накрененного судна……. 86

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Наумов В.С., Кочнева И.Б., Кочнев Ю.А. Матричный метод интегральной оценки воздействия на окружающую среду работ по подъему и утилизации судна…… 95

Лебедева Е.Г., Сомпольцева А.А. Результаты опытных работ по применению перспективного способа промывки судовых гидравлических систем с использованием пульсирующего двухфазного потока…… 105

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Афанасьев М.П., Афанасьева О.В., Хатрусов А.С. Повышение достоверности оценки текущего технического состояния судовых дизельных двигателей с учётом разноточности параметров диагностических каналов…….. 113

Сергеев М.С., Алексин Е.Н., Малинова Е.А. Температурные поля и обобщенные теплогидравлические характеристики пористого слоя произвольной морфологии при фильтрации жидкой фазы……. 124

Андрюхина П.А., **Портнова О.С., Чумаков М.С.** Обзор проблематики повышения эффективности методик балансировки…… 131

Синявский Н.Я., Сынашенко О.В., Кострикова Н.А. Определение концентрации ферромагнитных частиц износа в отработанных моторных маслах…… 136

Герасиди В.В. Цифровая трансформация судовых азиподов: методика валидации и спектрального анализа вибрации в реальных условиях эксплуатации, включая ледовые…….. 143

Погодин Ю.М., Смирнов А.А., Безухов А.П., Сандовский А.А. Влияние ограничений по материалам и технологиям на выбор параметров морского газотурбинного двигателя простого цикла…… 154

Белова С.С., Кожемякин В.В., Морозов Н.А., Романов А.И., Шаманов Д.Н. Стенд инжекторной системы аварийного расхолаживания с автозапуском через промежуточную емкость…… 162

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Говорухин В.П., Родионов В.А., Калинов М.И., Ильина Н.Н. Мониторинг морской обстановки по маршруту «Усть-Луга – Балтийск» с применением отечественных космических систем дистанционного зондирования Земли…… 168

Песцов И.Н., Вяткин Д.А., Малышева С.А. Сравнительный анализ российских и международных систем маячных знаков в обеспечении безопасности судоходства в Арктике…… 178

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Дементьев К.В. Метод разрешения двойственности положения автономных необитаемых подводных аппаратов в разреженных гидроакустических системах навигации…… 189

Аблязов Э.К., Аблязов К.А. Вероятностно-статистический метод определения запасных частей на устройства подъемно-транспортного оборудования…….. 195

Астреин В.В., Кондратьев С.И., Астреина Л.Б., Филатов В.И. Исследование нелинейных временных рядов судовой автоматической идентификационной системы…….. 203

Астреин В.В., Кондратьев С.И., Астреина Л.Б., Филатов В.И. Исследование нелинейной модели движения судна-цели по параметрам Автоматической идентификационной системы……. 213

Данцевич И.М., Лубенцов В.Ф. Анализ и синтез метода многорежимного управления морскими технологическими комплексами…… 222

Ефанов Д.В., Елина Е.И. Метод синтеза самодиагностируемых устройств для судовых информационно-измерительных и управляющих систем (Часть 2)…… 231

Май С.З., Ходашинский И.А., Шурыгин Ю.А. Обзор современного состояния морских беспилотных поисковых систем…… 238

Шаталова Н.В., Бородина О.В. Семантическое пространство знаний системы поддержки принятия решений по безопасности морских транспортных систем…… 249

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Скороходов Д.А., Каминский В.Ю., Королев О.А. Алгоритм оценки пожарной опасности морского судна как фактора классификации экологических рисков водного транспорта..... 259

Скороходов Д.А., Каминский В.Ю., Маринов М.Л. Алгоритм интеллектуальной оценки эффективности профессионально-ценностных действий назначенного лица по обеспечению экологической безопасности судна в системе классификации экологических проблем…… 266

Каминский В.Ю., Андреюк Н.Р. Скороходов Д.А. Архитектура подводной транспортной инфраструктуры на основе роевых систем автономных необитаемых подводных аппаратов…….. 275

Кириченко А.В., Туров Д.Е., Шаркова В.П. Принятие решений на планирование рейсов экспедиционных судов на основе логико-вероятностного подхода…… 282

Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Вальков В.Е., Шаркова В.П. Расчёт длительности рейса и численности ледокольного флота при организации перевозок в сложных ледовых условиях…… 287

Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Шагин Н.С., Шаркова В.П. Определение состава контейнерного флота для транспортных маршрутов Российской Федерации…… 293

Кулько Д.Д., Прощенко Д.Ю., Букин О.А. Беспилотные воздушные суда-амфибии: современное состояние и перспективы использования для мониторинга подводной части корпусов судов…… 304

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

Головацкая Л.И., Сорокин А.А., Пластинин А.Е. Формирование объяснимой интеллектуальной модели для оценивания причиненного вреда окружающей среде при разливах углеводородного сырья…… 315

Старжинская Н.В., Бойко А.И. Количественная оценка организационно-технических факторов, влияющих на качество технического обслуживания береговых объектов Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности мореплавания…….. 324

Королева Л.А., Малыгин И.Г. Моделирование аварийных разливов нефтепродуктов и загрязнения прибрежной защитной полосы при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на морском транспорте……. 333

Таранцев А.А. О нахождении закона распределения для выборки случайных величин и их генерация…… 344

Семенов Н.Н., Клюбина К.А. Развитие методов сверхразрешения в антенных решетках…… 351

Стаценко Л.Г., Герасименко Э.М., Скварник И.С., Комаров Д.А., Костенко С.С. Верификация стохастической модели двухлучевого распространения радиоволн над морской поверхностью на РРЛ-трассе 18 ГГц в Уссурийском заливе……. 358

Бойко А.И., Гончаренко С.Г. Многопараметрическая классификация морских причальных сооружений с применением ГИС-модуля (на примере порта Новороссийск)…….. 366

Данцевич И.М., Зеленков Г.А., Томилин А.Н., Лютикова М.Н. Моделирование динамики безэкипажных судов с использованиеммодифицированного фильтра Маджвика……. 375

CONTENTS page

DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS

Dmitry S. Mizgirev, Vladimir N. Vlasov, Dmitry V. Vlasov, Valery I. Reshnyak The problem of improving ship's ballast water treatment systems in accordance with international requirements…… 13

Pavel D. Podkorytov, Kirill D. Ovchinnikov Study of container vessels optimization for St. Petersburg and Kaliningard route using simulation modeling techniques…….. 22

Orkhan E. Alikhanov Justification of Controlled Parameters of Digital Information Modeling Affecting Cost Reduction in the Implementation of Marine Transport Vessel Projects……. 31

Margarita V. Antropova Comparative analysis of late and early Miller cycle strategies for ensuring fuel flexibility of marine gas engines…… 36

THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS

Vitaliy L. Zemlyak, Viktor M. Kozin Movement of a submerged body under an ice cover weakened by a transverse crack……. 46

Viktor M. Kozin Counter-flow of loads across the ice crossing…….. 54

Sergei A. Rusanovskiy, Roman I. Gramotin, Mikhail M. Muzyka, Sergei V. Platonenkov Development of an Automated System for Measuring and Processing Ship Heeling Angles…… 59

Danil A. Al'baev, Viktoriya Yu. Semenova, Determination of second-order diffraction forces due to the sum of frequencies arising on bichromatic waves based on three-dimensional potential theory……. 66

Egor Yu. Cheban, Artur I. Kozhevnikov, Dmitry. V. Nikushchenko, Stanislav A. Ermakov Numerical Study of the Hydrodynamics of Large-Tonnage Catamarans for Inland Waterways…….. 75

Viktoriya Yu. Semenova, Aleksandr I. Dintser Determination of the damping coefficient by a numerical method for calculating the first- and second-order response amplitude operators of roll motion for a heeled ship…… 86

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

Victor S. Naumov, Irina B. Kochneva, Yury A. Kochnev Matrix Method for Integrated Environmental Impact Assessment of Ship Lifting and Recycling Operations…… 95

Elena G. Lebedeva, Anna A. Sompoltseva The results of experimental work on the application of a promising method of flushing marine hydraulic systems using a pulsating two-phase flow…….. 105

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Mikhail P. Afanasyev, Olga V. Afanaseva, Aleksandr S. Khatrusov Improving the reliability of assessing the current technical condition of marine diesel engines considering unequal accuracy of diagnostic channels…… 113

Maximilian S. Sergeev, Evgeniy N. Aleksin, Ekaterina A. Malinova Temperature fields and generalized thermohydraulic characteristics of a porous layer of arbitrary morphology during liquid phase filtration……. 124

Polina A. Andriukhina, Olesya S. Portnova, Maxim S. Chumakov Overview of improving the effectiveness of balancing techniques…… 131

Nikolai Ja. Sinyavsky, Oksana V. Synashenko, Natalia A. Kostrikova Determination of the concentration of ferromagnetic wear particles in used motor oils……... 136

Viktor V. Gerasidi Digital transformation of marine azipods: a methodology for validation and spectral analysis of vibration in real operating conditions, including ice conditions…… 143

Yuri M. Pogodin, Alexander A. Smirnov, Andrey P. Bezukhov, Alexander A. Sandovsky Influence of material and technology restrictions on the selection of parameters of a simple cycle marine gas turbine engine…… 154

Sofya S. Belova, Vyacheslav V. Kozhemyakin, Nikita A. Morozov, Alexander I. Romanov, Dmitriy N. Shamanov Stand for an emergency cooldown injector system with autostart via an intermediate tank…… 162

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Valery P. Govorukhin, Vladislav A. Rodionov, Mikhail I. Kalinov, Nataliya N. Ilina Maritime Situational Monitoring along the Ust-Luga – Baltiysk Route Using Domestic Space-Based Earth Remote Sensing Systems…… 168

Ivan N. Pestsov, Dmitrii A. Viatkin, Svetlana A. Malysheva Comparative analysis of russian and international lighthouse systems in ensuring safety of navigation in the arctic…… 178

SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING

Kirill V. Dementiev Position duality resolution method for autonomous underwater vehicles in sparse hydroacoustic navigation systems…….. 189

Emil K. Ablyazov, Kemal A. Ablyazov Probabilistic and statistical method for determining spare parts for lifting and transport equipment…… 195

Vadim V. Astrein, Sergey I. Kondratiev, Liudmila B. Astreina, Viktor I. Filatov Research of nonlinear time series of ship's automatic identification system…… 203

Vadim V. Astrein, Sergey I. Kondratiev, Liudmila B. Astreina, Viktor I. Filatov Research of the nonlinear model of moving the target vessel based on the Automatic identification system parameters…… 213

Igor M. Dantsevich, Valery F. Lubentsov Analysis and synthesis of the method of multi-mode control of marine technological complexes…… 222

Dmitry V. Efanov, Yeseniya I. Yelina A method for designing self-diagnostic devices for shipboard information-measuring and control systems (Part 2)…… 231

Xuan Dung Mai, Ilya A. Hodashinsky, Yuri A. Shurygin, Review of the current state of marine unmanned search systems…….. 238

Natalia V. Shatalova, Olga V. Borodina Semantic Knowledge Space of the Marine Transportation Systems Safety Decision Support System…… 249

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Dmitriy A. Skorokhodov, Valery Yu. Kaminsky, Oleg A. Korolev Algorithm for assessing the fire hazard of a marine vessel as a factor in the classification of environmental risks of waterborne transport… 259

Dmitriy A. Skorohodov, Valery Yu. Kaminsky, Marin L. Marinov Algorithm for the Intelligent assessment of the effectiveness of the designated person's professional-value actions in ensuring vessel environmental safety within the environmental problem classification system…….. 266

Valery Yu. Kaminsky, Nataliya R. Andreyuk, Dmitriy A. Skorokhodov Architecture of underwater transport infrastructure based on swarm systems of autonomous unmanned underwater vehicles……. 275

Aleksandr V. Kirichenko, Dmitrii E. Turov, Vasilisa P. Sharkova Decision-making for expedition vessel voyage planning based on a logic-probabilistic approach…… 282

Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko Vladimir E. Valkov, Vasilisa P. Sharkova Calculation of voyage duration and icebreaker fleet size for cargo transportation in severe ice conditions…….. 287

Aleksandr L. Kuznetsov, Aleksandr V. Kirichenko, Nikita S. Shagin, Vasilisa P. Sharkova Determination of the container fleet composition for transport routes of the Russian Federation…… 293

Dmitrii D. Kulko, Dmitrii Yu. Proschenko, Oleg A. Bukin Amphibious Unmanned Aerial Vehicles: Current State and Prospects for Monitoring the Underwater Part of Vessel Hulls…….. 304

MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Lesya I. Golovackaya, Aleksandr A. Sorokin, Andrey E. Plastinin Formation of an explainable intellectual model for assessing the environmental damage caused by hydrocarbon spills…….. 315

Natalya V. Starzhinskaya, Anna I. Boyko Quantitative assessment of organizational and technical factors affecting the quality of maintenance of Global Maritime Distress and Safety System in case of disaster and to ensure the safety of navigation…… 324

Lyudmila A. Koroleva, Igor G. Malygin Modeling of emergency oil product spills and pollution of the coastal protective strip in response to emergency situations in maritime transport…….. 333

Alexander A. Tarantsev On finding the distribution law for a sample of random values and their generation…… 344

Nikolai N. Semenov, Ksenia A. Klubina Development of super-resolution methods in antenna arrays….. 351

Lyubov G. Statsenko, Eduard M. Gerasimenko, Igor S. Skvarnik, Dmitry A. Komarov, Sergey S. Kostenko Verification of a stochastic two-ray radio-wave propagation model over the sea surface on an 18 GHz radio relay link in Ussuri bay…….. 358

Anna I. Boyko, Sofia G. Goncharenko Multiparametric classification of marine berthing facilities using a GIS module (using the Novorossiysk port as an example) …….. 366

Igor M. Dantsevich, Gennady A. Zelenkov, Alexandr N. Tomilin, Marina N. Lyutikova Simulation of the dynamics of unmanned vessels using modified Majvik filter……. 375

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS

Обзорная статья
УДК 629.5.062.2:628.16
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.025

Проблема совершенствования судовых систем очистки балластных вод в соответствии с международными требованиями

Мизгирев Д.С. [1] mizgirevds@yandex.ru**, Власов В.Н.**[1] vn_vlasov@mail.ru, **Власов Д.В.**[1] dv_vlasov@vk.com,
Решняк В.И.[2] rv53@mail.ru
[1]Волжский государственный университет водного транспорта
[2] Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные проблемы проектирования систем очистки балластных вод на судах в соответствии с требованиями Международной конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управления ими. Проведен анализ существующих способов очистки. Рассмотрены современные технологии обработки, применяемые в различных системах управления балластными водами. Представлены результаты анализа эффективности существующих систем управления балластными водами, выявлены их основные недостатки и ограничения. Показана необходимость разработки новых компактных и энергоэффективных решений для очистки балластных вод. Обосновывается перспективность использования кавитационной обработки как дополнительного метода обеззараживания. Проведенный аналитический обзор обусловлен необходимостью совершенствования и обеспечения соответствия международным экологическим стандартам систем управления балластными водами при эксплуатации судов.
Ключевые слова: балластные воды, стандарт D-2, микроорганизмы, индикаторные микробы, системы управления балластными водами, ультрафиолетовое излучение, озонирование, кавитация.
Для цитирования: Мизгирев Д.С., Власов В.Н., Власов Д.В., Решняк В.И. Проблема совершенствования судовых систем очистки балластных вод в соответствии с международными требованиями. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 13—21. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.025

Review article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.025

The problem of improving ship's ballast water treatment systems in accordance with international requirements

Dmitry S. Mizgirev[1] mizgirevds@yandex.ru**, Vladimir N. Vlasov**[1] vn_vlasov@mail.ru,
Dmitry V. Vlasov[1] dv_vlasov@vk.com, **Valery I. Reshnyak** [2] rv53@mail.ru
[1]Volga State University of Water Transport, Russian Federation, [2]Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet, Russian Federation

Abstract. The article discusses the current problems of designing ballast water treatment systems on ships in accordance with the requirements of the International Convention on the Control and Management of Ballast Water and Sediments. The analysis of existing methods of their treatment. Modern purification technologies used in various ballast water management systems are considered. The results of an analysis of the effectiveness of existing ballast water management systems are presented, their main disadvantages and limitations are identified. The necessity of developing new compact and energy-efficient solutions for ballast water treatment is shown. The prospects of using cavitation treatment as an additional disinfection method are substantiated. The conducted analytical review is conditioned by the need to improve and ensure compliance with international environmental standards for ballast water management systems during ship operation.
Keywords: ballast water, D-2 standard, microorganisms, indicator microbes, ballast water management systems, ultraviolet radiation, ozonation, cavitation.
For citation: Dmitry S. Mizgirev, Vladimir N. Vlasov, Dmitry V. Vlasov, Valery I. Reshnyak, The problem of improving ship's ballast water treatment systems in accordance with international requirements Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 13—21. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.025

Введение

В настоящее время ключевым способом устранения динамических эксплуатационных, а также аварийных кренов и дифферентов судна является работа балластной системы. Ее основное рабочее тело — балластная вода (БВ) - позволяет оперативно корректировать положение (посадку) плавсредства в воде [1].

Правовую основу обращения с балластными водами устанавливает «Международная конвенция о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими» (далее – МК). Документ был принят 13.02.2004 г., и, после ратификации Российской Федерацией, вступил в силу 22.10.2019 г. [2, 3].

© Мизгирев Д.С., Власов В.Н., Власов Д.В., Решняк В.И., 2026

Согласно МК, под БВ понимается жидкость с взвешенными в ней веществами, принимаемая на борт судна с конкретными целями:

- регулирование дифферента,
- корректировки крена,
- контроля осадки,
- обеспечения остойчивости,
- снижения напряжений в корпусе судна.

Важнейшая функция МК — установление строгих норм и процедур обращения с БВ и осадками. Это необходимо для минимизации риска инвазии чужеродных водных организмов и патогенных микроорганизмов, которые могут переноситься вместе с водяным балластом и наносить ущерб экосистемам, которые могут весьма успешно акклиматизироваться в новом ареале обитания.

Требования международной конвенции

Согласно МК, вводится соответствующий стандарт качества БВ (так называемый стандарт D-2). Так суда, осуществляющие управление БВ, должны сбрасывать <10 жизнеспособных организмов на 1 м^3, минимальный размер которых равен 50 мкм или более, и <10 жизнеспособных организмов на 1 мл, минимальный размер которых <50 мкм и равен 10 мкм или более; при этом сброс индикаторных микробов не превышает установленных концентраций [2]:

- токсикогенный вибрион холеры с менее чем 1 кое на 100 мл или <1 кое на 1 гр (сырого веса) образцов зоопланктона;
- кишечную палочку - <250 КОЕ на 100 мл;
- кишечные энтерококки - менее 100 КОЕ на 100 мл.

В свою очередь, при проектировании балластной системы должны выполняться следующие правила:

- безопасность по отношению к судну и экипажу;
- экологическая приемлемость, т.е. технологии обработки БВ не должны оказывать большего экологического ущерба, чем тот, который они устраняют;
- практичность, т.е. совместимость с конструкцией и режимами эксплуатации судна;
- экономичность (эффективность по затратам на реализуемый проект балластной системы);
- биологическая эффективность с точки зрения удаления или лишения активности иным образом вредных и патогенных организмов в БВ.

Необходимо отметить, что исходная забортная вода не является идеальной с точки зрения микробиологического и патогенного состава. Яркое подтверждение этому представила международная научная экспедиция, работавшая на судне «Tara». Исследователям удалось отобрать образцы морской воды в разных частях Мирового океана и выявить поразительное многообразие вирусной фауны - около 200 тысяч видов морских вирусов. Особого внимания заслуживает тот факт, что микробы составляют примерно 60% биомассы Мирового океана, которые играют ключевую роль в океанических экосистемах, но систематические наблюдения проводились только в отдельных акваториях. При этом динамика популяций и таксономическое разнообразие микробов во многом определяется воздействием морских вирусов, чья экологическая роль и филогенетическое многообразие пока остаются недостаточно исследованными [4].

В рамках масштабного проекта Global Ocean Viromes (GOV) 2.0 ученые провели целенаправленный отбор 145 водных проб на различных глубинах в разных океанических регионах, включая 41 образец из арктических вод. После секвенирования виромов (вирусных сообществ) из собранных проб исследователи получили беспрецедентные данные: число идентифицированных ДНК-вирусов превысило предыдущие оценки в 12 раз по сравнению с результатами первой фазы проекта (рис. 1) [4].

Также в ходе исследования ученые совершили несколько значимых открытий, пересмотревших прежние представления о пространственном распределении морских вирусов. Прежде всего, им удалось дифференцировать пять отчетливых экологических зон обитания вирусных сообществ в масштабах всего Мирового океана.

Особенно примечательным стал обнаруженный феномен: вопреки устоявшемуся мнению о том, что экваториальные воды превосходят полярные по биоразнообразию, именно Арктический регион оказался настоящим очагом вирусного многообразия. Этот результат кардинально противоречит традиционным экологическим моделям, согласно которым тропические широты считаются центрами биоразнообразия из-за более благоприятных температурных условий и высокой продуктивности экосистем.

Полученные данные (рис. 2) не только расширяют представления о географическом распределении морских вирусов, но и ставят под сомнение универсальные закономерности, ранее считавшиеся незыблемыми в морской вирусологии. Открытие арктического очага биоразнообразия указывает на необходимость пересмотра существующих экологических концепций и углубленного изучения факторов, определяющих формирование вирусных сообществ в экстремальных условиях высоких широт [4].

Пути решения проблемы обработки балластных вод

Как показано авторами работы [5], существующие системы управления БВ (СУБВ) начинают не соответствовать стандарту D-2 вскоре после ввода в эксплуатацию, так как невозможно гарантировать, что каждая из них будет эффективно функционировать в течении всего срока службы в меняющихся при переходе судна акваториях и переменных внешних условиях окружающей среды. Таким образом, проблема совершенствования СУБВ как нельзя актуальна и требует скорейшего разрешения.

В настоящее время для очистки БВ, в основном, используются те же методы, которые применяется и для очистки питьевой воды, однако с целью выполнения требований стандарта D-2, интенсивность обработки производится с большим запасом. Данные методы можно разделить на следующие основные категории [6 - 8]:

- Механические методы:

- *Фильтрация* (удаление крупных организмов и взвешенных частиц. Современные фильтры способны задерживать частицы размером до 50 мкм);
- *Центрифугирование* (использование центробежных сил для отделения более плотных частиц от воды. Эффективна для удаления осадка и крупных организмов).

- Физико-механические методы:
  - *Кавитация* (использование акустической или гидродинамической кавитации для разрушения клеток микроорганизмов).
- Физико-химические методы:
  - *Коагуляция* (слипание мелких взвешенных частиц в более крупные образования для их дальнейшего отделения);
  - *Электролиз* (нейтрализация микроорганизмов за счет химических веществ, выделяющихся на электродах при пропускании электрического тока).
  - *Обработка ультрафиолетовым излучением (УФИ)* (уничтожение ДНК и РНК микроорганизмов, делая их неспособными к размножению. УФ-обработка является экологически чистой альтернативой химическим методам, но ее эффективность зависит от прозрачности воды);
- Химические методы:
  - *Обработка биоцидами* (использование химических веществ – сильных окислителей (хлор, озон, фтор, пероксид водорода, ионы серебра, меди и т.п.) для уничтожения живых организмов);
  - *Деоксигенация* (снижение содержание кислорода в воде, создавая неблагоприятные условия для выживания большинства морских организмов. Этот метод эффективен против аэробных организмов, но не действует на анаэробов).

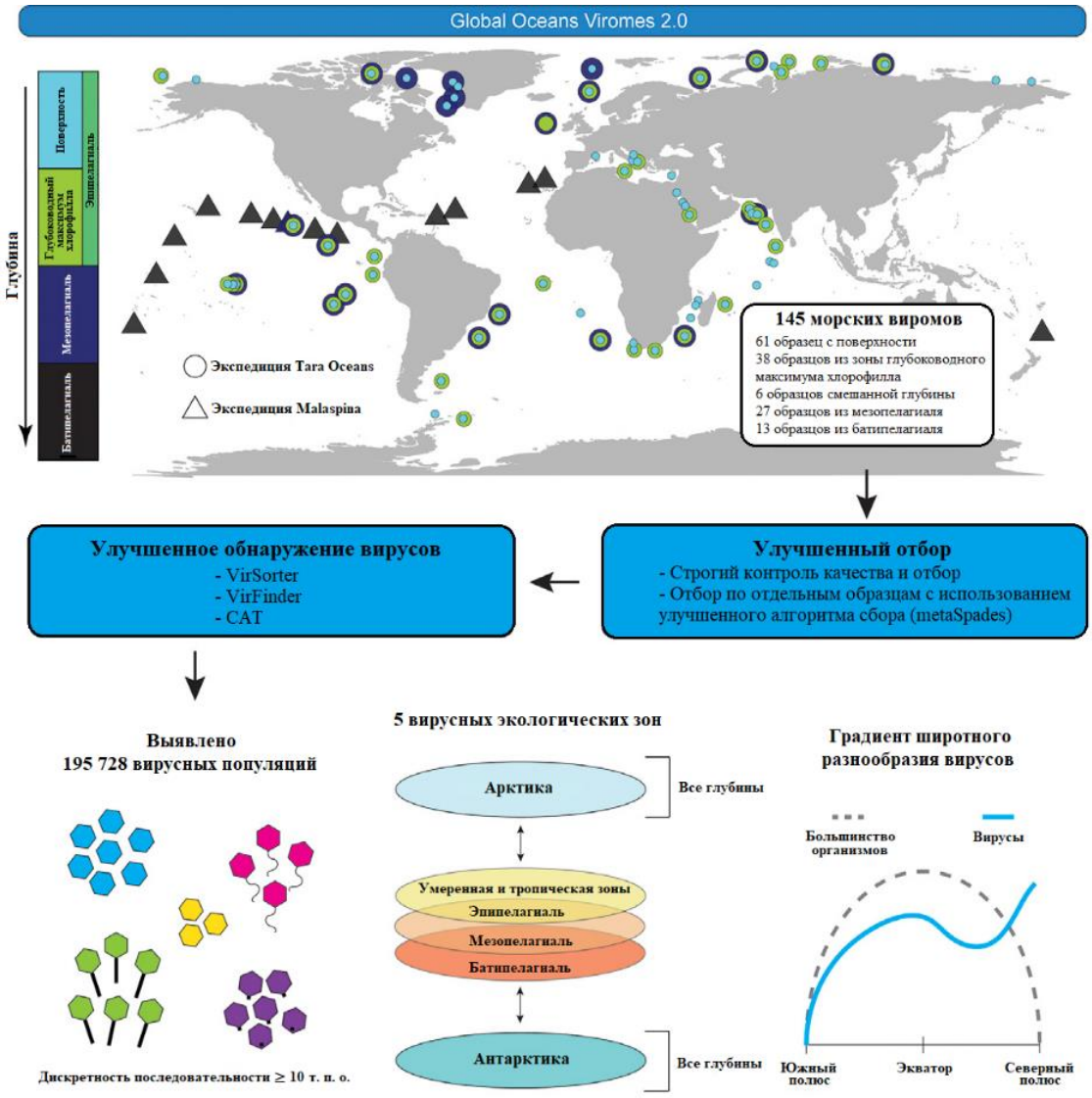


Рис. 1. Результаты исследовательского проекта Global Ocean Viromes 2.0

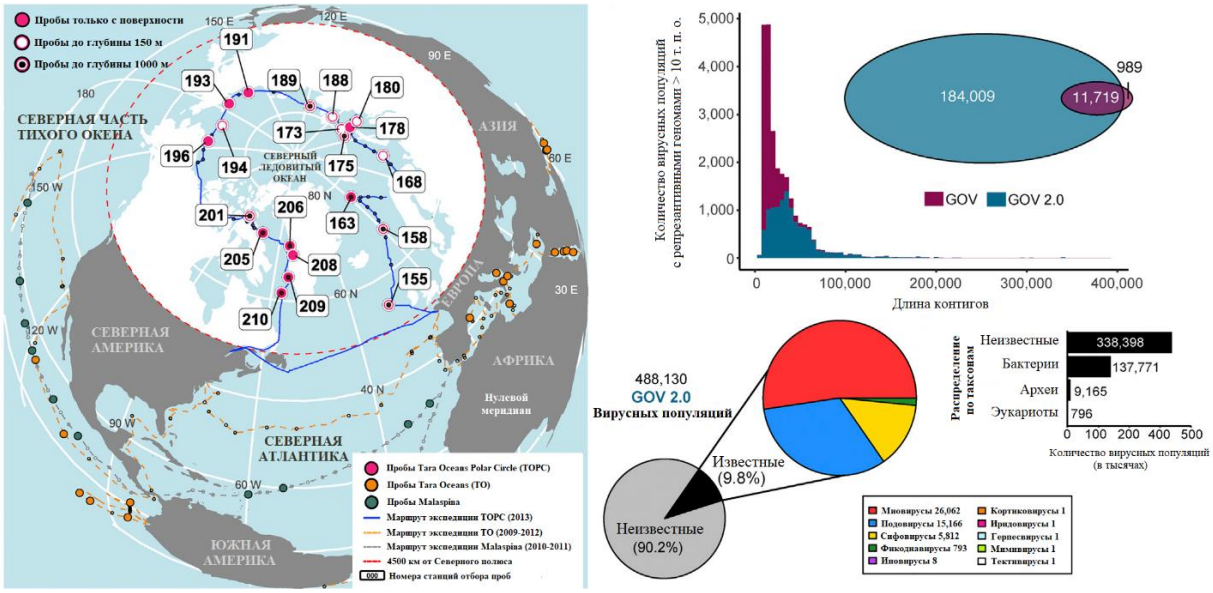


Рис. 2. Биоразнообразие вирусов в Арктике

- Биологические методы:
  - *Инвазия (д*обавление в БВ хищных или паразитных организмов с целью уничтожения вредных микроорганизмов).

На практике, для достижения максимальной эффективности, целесообразно применять комбинированные схемы, объединяющие несколько методов из разных категорий. Такой подход позволит компенсировать недостатки каждого метода в отдельности достоинствами другого.

Наиболее перспективно использовать механические и физические методы, так как химические методы требуют значительных затрат реагентов, что не является оптимальным (и даже возможным) для судовых условий. Также использование химически активных реагентов нередко сопряжено с комплексом серьёзных негативных последствий. Среди них — угроза благополучию членов экипажа, коррозионное воздействие на элементы балластных систем (включая трубопроводы и оборудование), преждевременная деградация защитных покрытий цистерн, а также экологический ущерб морским экосистемам при сбросе обработанной БВ.

Таким образом, можно выделить наиболее эффективные комбинации [6]:

- Фильтрация и УФ-обработка (сначала механической фильтрацией удаляются крупные частицы и организмы, затем УФИ нейтрализует оставшиеся микроорганизмы - это позволяет снизить нагрузку на УФ-установку, возможно широкое применение на судах среднего и крупного тоннажа);
- Сепарация и деоксигенация (центробежное отделение осадка и крупных организмов, затем снижение концентрации кислорода для подавления аэробной микрофлоры, является очень энергоэффективным методом, но не воздействует на анаэробные микроорганизмы).
- Фильтрация и озонирование (механическая очистка от крупных примесей, затем дозированное введение озона для уничтожения бактерий и вирусов, в настоящее время это наиболее распространенная схема на судах внутреннего плавания в отношении сточной и питьевой воды).

Все перечисленные выше методы так или иначе уже используются для очистки загрязненных вод на судах и могут успешно применяться с той же целью для обработки БВ.

Наиболее сбалансированным решением остается гибридная схема «фильтрация + УФИ», которая соответствует международным стандартам, так как она экономична в долгосрочной перспективе и минимизирует экологический след судоходства.

Необходимо отметить, что согласно МК возможна полная замена БВ в открытом море (правило D-1) на расстоянии не менее чем 50 морских миль от ближайшего побережья и при глубине акватории не менее 200 м. Эффективность замены БВ в таком случае должна достигать 95% за счет прокачки объема, кратного трем вместимостям каждой балластной цистерны. Однако для судов, эксплуатируемых на внутренних водных путях (ВВП), а также судов смешанного («река-море») плавания данной метод становится неприменим из-за ограничен по классу и району плавания, которые не предполагают выход в открытое море. Также подобные условия замены балласта во многом и не совсем приемлемы и для морских судов, по причине того, что конструкция многих судов не предусматривает возможности сдачи БВ на приемные сооружения. Вследствие чего замена балласта в большинстве своем выглядит менее целесообразным по сравнению с установкой СУББВ на самом судне для соответствия требованиям стандарта D-2 [2, 8].

Однако основная проблема заключается в том, что согласно МК необходимо установить СУББВ на все эксплуатируемые суда. Это значит, что для каждого конкретного судна с учетом его конструктивных особенностей потребуется производить техническую доработку по установке СУББВ. Вследствие чего комплект оборудования СУББВ должен быть максимально компактный [9] (рис. 3).

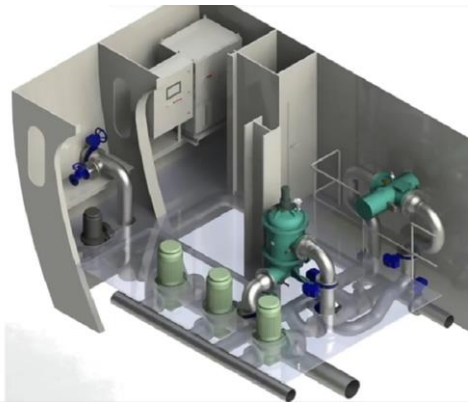


Рис. 3. Пример компоновки СУБВ в отсеке судна

На данный момент разработано большое число установок СУБВ с различными технологиями обработки БВ. Обобщенные данные по ним представлены в табл. 1 [8].

Таблица 1

СУБВ со станциями различных типов

Наименование установки	Страна-производитель	Применяемые технологии			
		Центрифугирование	Фильтрация	Обеззараживание	Дополнительная обработка
«PeracleanOcean»* (стационарная)	Германия	Гидроциклон	+	Пергидроль	-
«Electro-Clean»*	Корея	-	+	-	Электролиз
«Special Pipe Ballast Water System»*	Япония	-	+	Озонирование	-
«EctoSys»*	Швеция	-	+	-	Электро-химическая обработка
«Pure Ballast System»*	Швеция	Центробежный сепаратор	+	Озонирование	-
«NK Ballast Water Treatment System»*	Корея	-	+	Озонирование	-
«Hitachi Ballast Water Purification System»*	Япония	-	+	-	Коагуляция и магнитная сепарация
«Resource Ballast Technologies System»*	ЮАР	-	+	УФИ	Кавитация
«GloEn-Patrol TM Ballast»*	Корея	-	+	УФИ	-
«Ocean Saver Ballast Water»*	Норвегия	-	+	Хлорирование	Электролиз
«TG Ballastcleaner»* (стационарная)	Япония	-	+	Хлорирование / фторирование	Кавитация
«Greenship Sedinox»*	Нидерланды	Мультициклон	-	-	Электролиз
«Ecochlor»*	США	-	+	Хлорирование	Электролиз
«Blue Ocean Shield»*	Китай	-	+	Хлорирование	-
«Hyundai Heavy Industries»*	Корея	-	+	Хлорирование	Электролиз
«Aqua Tri Comb»*	Германия	-	+	УФИ	-
«Aqua Tri Comb 2»	Германия	-	+	Электролиз	Кавитация и выпускные газы
«SEDNA»	Германия	Гидроциклон	+	Биореагент	-
«Greenship Sedinox»	Нидерланды	-	+	Озонирование	-
«HydeMarine»	Германия	-	+	УФИ	-
«Desmiocean-guard»	Финляндия	-	+	УФИ	-
«Маринтех»	Россия	-	+	УФИ	-
«CompactClean»*	Дания	-	+	УФИ	-
«PACT Marine BWMS»*	Китай	-	+	УФИ	-

*) Имеют одобрение ИМО и Морского Регистра

Условные обозначения: «+» - технология применяется в СУБВ; «-» - технология не применяется в СУБВ.

Анализируя табл. 1, можно сделать вывод, что большинство эксплуатируемых в настоящее время СУБВ для очистки БВ используют фильтрацию и обеззараживание при помощи УФИ, либо при

помощи активного реагента (озонирование либо хлорирование) как основного метода обеззараживания. Также происходит частое дополнение химической обработки электролизом либо другими способами.

Принципиальные схемы типовых установок «Peraclean Ocean» и «TG Ballastcleaner» представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

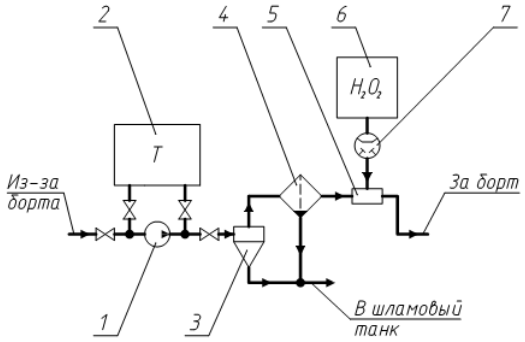


Рис. 4. Технологическая схема системы «Peraclean Ocean»:
1 – насос балластный; 2 – танки балластные; 3 – гидроциклонный модуль; 4 – фильтр самоочищающийся; 5 – смеситель-дозатор; 6 – расходная емкость пероксида водорода; 7 – насос-дозатор

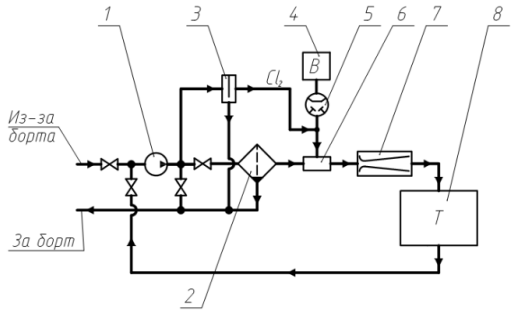


Рис. 5. Технологическая схема системы «TG Ballastcleaner»:
1 – насос балластный; 2 – фильтр самоочищающийся; 3 – электролизер; 4 – расходная емкость борсодержащего препарата; 5 – насос-дозатор; 6 – смеситель; 7 – кавитатор (труба Вентури); 8 – танки балластные.

СУББ, представленная на рис. 5 является более эффективной и перспективной в связи с применением многоступенчатой очистки и эффективного обеззараживания БВ, отсутствием постоянной потребности в химических реагентах.

Тем не менее, в настоящее время нет достаточно эффективных, экономичных и компактных систем.

Необходимо отметить, что использование УФИ для обеззараживания БВ не является идеальным решением по причине того, что УФИ эффективно только в случае, если вода достаточно прозрачна. Наличие взвешенных частиц, мути или сильных органических загрязнений снижает проникающую способность УФИ, что уменьшает степень обеззараживания. Для решения данной проблемы в подобных СУББ устанавливаются фильтры перед тем, как производить УФ-обработку. Однако в случае сильной загрязненности БВ это значительно увеличивает нагрузку на них, что потребует их частой замены. Учитывая продолжительность международных рейсов, подобные СУББ могут не соответствовать требования стандарта D-2 вскоре после отхода из последнего порта, что косвенно подтверждается результатами полученным в работе [5].

Использование хлорирования в основе СУББ также несет определенные риски в связи с высокой токсичностью как самого хлора, так и его производных, а также его сильной коррозионной активностью. Это означает, что подобные СУББ требуют обязательного наличия этапа дехлорирования в своем технологическом процессе, что значительно усложняет и удорожает подобные установки, т.к. дехлорирование производится с помощью других реагентов, например, с использованием бисульфита натрия.

В свою очередь, озонаторные установки отличаются сравнительно высоким энергопотреблением, отсутствием остаточного биоцидного эффекта, а также наличием узла деструкции озона перед сбросом БВ, что приводит к значительным массогабаритным показателям подобных СУББ (рис. 6).



Рис. 6. Общий вид СУББ NK-O3 BlueBallast

В связи с тем, что в настоящее время в серийно выпускаемых СУББ наиболее распространена технология «фильтрация + УФИ», возможным решением вышеуказанных проблем является дополнение процесса очистки кавитационной обработкой.

Кавитация как способ обработки балластных вод

Под кавитацией понимают физическое явление, при котором в жидкости образуются и резко схлопываются парогазовые пузырьки (кавитационные каверны) [10]. Этот процесс сопровождается локальными гидроударами и высокими температурами, что позволяет считать кавитацию мощным инструментом для очистки БВ.

При схлопывании кавитационных пузырьков происходят [11]:

- механическое разрушение клеток микроорганизмов за счет ударных волн и микропотоков;
- химическое окисление органических загрязнителей;
- термическая деструкция сложных соединений в «горячих точках» кавитации;
- акустическая дезинтеграция частиц и биопленок.

Согласно авторам работы [6] кавитация является одним из наиболее эффективных методов очистки БВ.

Кавитационные установки, как правило, компактны и не требуют больших площадей. Их с легкостью можно будет интегрировать в существующие СУББВ на судах различных типов, включая морские и речные суда смешанного («река-море») плавания.

В отличии от УФ-обработки, эффективность кавитационной обработки не зависит от мутности и цветности воды. Это позволит использовать подобную систему в прибрежных зонах с высоким содержанием взвешенных частиц и органики, где другие методы могут быть не так эффективны.

Кавитационная обработка также лишена недостатков присущих хлорированию и озонированию.

Таким образом, целесообразно дополнить существующие схемы СУББВ кавитатором как дополнительным элементом обеззараживания БВ.

Кроме того, с целью снижения рисков инвазии живых организмов, развившихся в балластных танках судна во время рейса, открывается возможность вторичной обработки БВ кавитацией при дебалластировке судна, что дополнительно повысит эффективность и надежность СУББВ.

Расположение генератора кавитации в составе СУББВ необходимо предусматривать таким образом, чтобы обеззараживающее воздействие кавитации использовалось наиболее полно, однако при этом не причинялся вред кавитационной эрозией судовым системам и их отдельным устройствам [12].

Однако, как показывает анализ [8], практическое применение акустической кавитации ограничено сложностью и высокой стоимостью оборудования, значительным энергопотреблением, высокими затратами на эксплуатацию и обслуживание ультразвуковых генераторов и излучателей. Механические и электромеханические аппараты также сложны и ненадежны, отличаются высоким энергопотреблением, значительной массой и габаритами. Химические, физико-химические и физико-механические генераторы кавитации неприменимы в судовых условиях. Эффективные гидродинамические кавитаторы, в свою очередь, требуют значительного давления жидкости на входе, что не может обеспечить большинство применяемых на судах насосов балластных систем. Таким образом, разработка конструкции кавитатора, отвечающего всем требованиям для применения в составе СУББВ является актуальной и востребованной научной задачей, требующей скорейшего разрешения.

Заключение

Приведенный в данной работе материал позволяет сделать вывод о том, что выбор оптимальной технологии очистки БВ зависит от множества факторов.

В частности, при подборе системы очистки учитывают:

- тип судна и его маршрут (для судов, курсирующих в экологически чувствительных зонах, приоритет — безотходные методы);
- объем БВ (для крупных судов рентабельны автоматизированные комплексы);
- требования международных норм (стандарты ИМО по содержанию жизнеспособных организмов в сбросе);
- стоимость эксплуатации (химические методы дороже из-за закупки реагентов и необходимости утилизации отходов);
- доступность обслуживания (в отдаленных портах сложнее обеспечивать запас реагентов или биоцидов).

В свою очередь, современные требования к очистке БВ диктуют необходимость:

- отказа от исключительно химических методов в пользу экологически безопасных альтернатив;
- внедрения комбинированных систем, сочетающих механическую, физическую и минимально инвазивную химическую обработку;
- разработки адаптивных технологий, учитывающих условия эксплуатации судна.

Одним из путей решения обозначенных проблем предлагается использование кавитации в составе основного технологического процесса СУББВ. Это позволит достичь высокой эффективности обеззараживания БВ в процессе работы СУББВ при балластных операциях. Кроме того, открывается возможность вторичной обработки БВ при дебалластировке судна, что дополнительно снизит риски инвазии живых организмов, повысит эффективность и надежность СУББВ.

Также, выявлена проблема необходимости разработки аппаратной базы процесса обеззараживания кавитацией (конструкции кавитатора), отвечающей всем требованиям для применения в составе СУББВ.

Таким образом, совершенствование СУББВ является актуальной и востребованной научной задачей, требующей скорейшего разрешения.

Литература

1. Александров А.В. Судовые системы: Учебное пособие для кораблестроительных вузов и факультетов — Ленинград: Судпромгиз, 1962. — 433 с.: ил.
2. Международная конвенция о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими 2004 года. СПб: ЦНИИМФ, 2005. 120 с.
3. Международная конвенция о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими : [текст принят 13 февраля 2004 г. в Лондоне] / ратифицирована Указом Президента РФ от 21 декабря 2018 г. № 729 // Собрание законодательства РФ. — 2019. — № 2. — Ст. 356.
4. Gregory Ann C. Acinas, Silvia G. Marine DNA Viral Macro- and Microdiversity from Pole to Pole. Cell, Volume 177, Issue 5, 1109 - 1123.e14
5. Biological testing of ships' ballast water indicates challenges for the implementation of the Ballast Water Management Convention / Outinen O., Bailey S. A., Casas-Monroy O., Delacroix S., Gorgula S., Griniene E., Kakkonen J. E., & Srebaliene, G. // Frontiers in Marine Science, 11(2). - 2024, - DOI: 10.3389/fmars.2024.1334286

6. Мизгирев Д.С. Объединенная судовая система приготовления и кондиционирования питьевой воды / Д.С. Мизгирев, Е.А. Черепкова, А.С. Слюсарев, Н.С. Отделкин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2019. – Т. 27, № 3. – С. 173-183. – DOI: 10.22363/2313-2310-2019-27-3-173-183
7. Мизгирев Д.С., Гурьянов Н.М. Анализ технических решений судовых систем питьевой воды / Д. С. Мизгирев // Научные проблемы водного транспорта. – 2020. – № 63. – С. 77-89. – DOI: 10.37890/jwt.vi63.79
8. Курников А.С. Научное обоснование технических решений создания и совершенствования природоохранного оборудования для водного транспорта и предприятий речного флота: монография / А. С. Курников, Д. С. Мизгирев, Т.А. Михеева – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2017. – 434 с.
9. Калинин О., Минаков С. Системы управления балластными водами: вопросы установки // Журнал «Морской флот», 2018, №1, с. 33–41
10. Кавитационные процессы в судовых трубопроводных системах / Д. С. Мизгирев, В. Н. Власов, Д. В. Власов, В. Г. Сугаков // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 3-3(69). – С. 22-28. – DOI 10.37220/MIT.2025.69.3.051
11. Mizgirev D., Vlasov D., Vlasov V. Mathematical description of the cavitation process in the jet apparatus // Journal of Physics: Conference Series 2131 (2021) 052054, DOI:10.1088/1742-6596/2131/5/052054
12. Мизгирев Д. С. Проблема возникновения и полезного использования кавитации в судовых системах / Д. С. Мизгирев, В. Н. Власов, Д. В. Власов // Транспортное дело России. – 2024. – № 7. – С. 171-174

References

1. Aleksandrov A.V. Sudovyye sistemy [Ship Systems]. Uchebnoye posobiye dlya korablestroitel′nykh vuzov i fakul′tetov: Leningrad: Sudpromgiz, 1962. 433 s: il.
2. Mezhdunarodnaya konventsiya o kontrole sudovykh ballastnykh vod i osadkov i upravlenii imi 2004 goda [The International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments of 2004 year]. SPb: TSNIIMF, 2005. 120 s.
3. Mezhdunarodnaya konventsiya o kontrole sudovykh ballastnykh vod i osadkov i upravlenii imi [The International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments]: [tekst prinyat 13 fevralya 2004 g. v Londone] / ratifitsirovana Ukazom Prezidenta RF ot 21 dekabrya 2018 g. № 729 // Sobraniye zakonodatel′stva RF. 2019. № 2. St. 356.
4. Gregory Ann C. Acinas, Silvia G. Marine DNA Viral Macro- and Microdiversity from Pole to Pole. Cell, Volume 177, Issue 5, 1109 - 1123.e14
5. Biological testing of ships' ballast water indicates challenges for the implementation of the Ballast Water Management Convention, Outinen O., Bailey S. A., Casas-Monroy O., Delacroix S., Gorgula S., Griniene E., Kakkonen J. E., & Srebaliene, G. Frontiers in Marine Science, 11(2). 2024, DOI: 10.3389/fmars.2024.1334286
6. Mizgirev D.S. Ob′′yedinennaya sudovaya sistema prigotovleniya i konditsionirovaniya pit′yevoy vody [Integrated ship-based drinking water preparation and conditioning system], D.S. Mizgirev, E.A. Cherepkova, A.S. Slyusarev, N.S. Otdelkin. Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost′ zhiznedeyatel′nosti. 2019. T. 27, № 3. S. 173-183, DOI: 10.22363/2313-2310-2019-27-3-173-183
7. Mizgirev D.S., Gur′yanov N.M. Analiz tekhnicheskikh resheniy sudovykh sistem pit′yevoy vody [Analysis of technical solutions for shipboard drinking water systems], D. S. Mizgirev // Nauchnyye problemy vodnogo transporta. 2020. № 63. S. 77-89, DOI: 10.37890/jwt.vi63.79
8. Kurnikov A.S. Nauchnoye obosnovaniye tekhnicheskikh resheniy sozdaniya i sovershenstvovaniya prirodookhrannogo oborudovaniya dlya vodnogo transporta i predpriyatiy rechnogo flota [Scientific substantiation of technical solutions for the creation and improvement of environmental protection equipment for water transport and river fleet enterprises], monografiya, A. S. Kurnikov, D. S. Mizgirev, T.A. Mikheyeva, N. Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2017. 434 s.
9. Kalinin O., Minakov S. Sistemy upravleniya ballastnymi vodami: voprosy ustanovki [Ballast water management systems: installation issues], Zhurnal «Morskoy flot», 2018, №1, s. 33–41
10. Kavitatsionnyye protsessy v sudovykh truboprovodnykh sistemakh [Cavitation processes in marine pipeline systems] / D. S. Mizgirev, V. N. Vlasov, D. V. Vlasov, V. G. Sugakov // Morskiye intellektual′nyye tekhnologii. 2025. № 3-3(69). S. 22-28, DOI 10.37220/MIT.2025.69.3.051
11. Mizgirev D., Vlasov D., Vlasov V. Mathematical description of the cavitation process in the jet apparatus, Journal of Physics: Conference Series 2131 (2021) 052054, DOI:10.1088/1742-6596/2131/5/052054
12. Mizgirev D. S. Problema vozniknoveniya i poleznogo ispol′zovaniya kavitatsii v sudovykh sistemakh [The problem of the occurrence and useful use of cavitation in marine systems], D. S. Mizgirev, V. N. Vlasov, D. V. Vlasov, Transportnoye delo Rossii. 2024. № 7. S. 171-174

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

Мизгирев Дмитрий Сергеевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижегородская область, город Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: mizgirevds@yandex.ru

Dmitry S. Mizgirev, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Professor of the Department of Lifting and Transport Machines and Mechanical Repair, Volga State University of Water Transport, Nesterova 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: mizgirevds@yandex.ru

Власов Владимир Николаевич, старший преподаватель кафедр подъемно- транспортных машин и машиноремонта, эксплуатации судовых энергетических установок, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижегородская область, город Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: vn_vlasov@mail.ru

Vladimir N. Vlasov, Senior Lecturer at the Departments of Lifting and Transport Machines and Mechanical Repair, Operation of Ship Power Plants, Volga State University of Water Transport, Nesterova 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: vn_vlasov@mail.ru

Власов Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижегородская область, город Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: dv_vlasov@vk.com

Dmitry V. Vlasov, postgraduate student of the Department of Lifting and Transport Machines and Mechanical Repair, Volga State University of Water Transport, Nesterova 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: dv_vlasov@vk.com

Решняк Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химии и экологии, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: rv53@mail.ru

Valery I. Reshnyak, Dr.Sci.(Eng), Professor, Head of the Department of Chemistry and Ecology, Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet, 198035, St. Petersburg, Dvinskaya str., 5/7, e-mail: rv53@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 26.02.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.06.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 11.06.2026.

Научная статья
УДК 004.942:629.5.01
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.026

Использование методов имитационного моделирования для решения задачи обеспечения контейнерных перевозок между СПб и Калининградом

Подкорытов П.Д.[1] ppodkorytov5@gmail.com, **Овчинников К.Д.**[1] ovchinnikov_kd@mail.ru
[1]Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В работе представлены результаты разработки упрощенной имитационной модели и пример её применения для выбора состава флота с целью обеспечения контейнерного грузопотока между портами Санкт-Петербург и Калининград в период с 2030 по 2039 гг. В имитационной модели круговой рейс судна был разбит на 10 этапов, включающих в себя как движение, так и погрузо-разгрузочные работы. Для учета погодных условий маршрут был разделен на части, для которых были заданы статистические волновые условия, по которым определялось ожидаемое падение скорости судна. Для ожидаемого грузооборота в период с 2030 по 2039 гг. были выполнены расчеты потребного количества одинаковых судов-контейнеровозов в диапазоне исходных данных по скорости от 15.5 до 20 уз и по контейнерной вместимости от 600 до 2300 TEU. Для полученных серий судов была выполнена оценка экономической эффективности по минимуму приведённых затрат. В результате выполненных расчетов получено, что оптимальной в рассматриваемых условиях является серия из четырех судов со скоростью 15.5 уз и контейнеровместимостью 1800 TEU. Предложенная в работе модель может быть применена для других маршрутов при внесении соответствующих изменений и уточнении исходных данных.
Ключевые слова: судно-контейнеровоз, контейнерные перевозки, имитационное моделирование, экономическая эффективность, минимум эксплуатационных затрат.
Для цитирования: Подкорытов П.Д., Овчинников К.Д. Использование методов имитационного моделирования для решения задачи обеспечения контейнерных перевозок между СПб и Калининградом. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 22—30. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.026

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.026

Study of container vessels optimization for St. Petersburg and Kaliningard route using simulation modeling techniques

Pavel D. Podkorytov[1] ppodkorytov5@gmail.com, **Kirill D. Ovchinnikov**[1] ovchinnikov_kd@mail.ru
[1]St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The paper presents the results of the development of a simplified simulation model and an example of its application for selecting the number of vessels to ensure container cargo traffic between the ports of St. Petersburg and Kaliningrad in the period from 2030 to 2039. The round trip of the vessel in the simulation model was divided into 10 stages, including movement and load/offload operations. The route was divided into parts, for which statistical wave conditions were set to take into account the speed decreasing in rough seas. The work performed calculations of the required number of identical container ships in the range of speed from 15.5 to 20 kn and container capacity from 600 to 2300 TEU to ensure the estimated expected cargo turnover in the period from 2030 to 2039. The minimum equivalent cost was chosen as the criterion of economic efficiency. As a result of the calculations performed, it was found that a series of four vessels with a speed of 15.5 kn is optimal in the conditions under consideration. and a container capacity of 1800 TEU. The model proposed in this paper can be applied to other routes if appropriate changes are made and the initial data is clarified.
Keywords: container ship, container transportation, simulation modeling, economic efficiency, minimum operating costs.
For citation: Pavel D. Podkorytov, Kirill D. Ovchinnikov Study of container vessels optimization for St. Petersburg and Kaliningard route using simulation modeling techniques, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 22—30. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.026

Введение

В последние годы ввиду сложившейся геополитической обстановки остро встал вопрос обеспечения ресурсами Калининградской области, являющейся эксклавом Российской Федерации. До февраля 2023 года доставка грузов осуществлялась преимущественно сухопутным способом – посредством железных и автомобильных дорог. В текущих условиях эти маршруты оказались частично или полностью заблокированными, что вызвало необходимость проработки новых логистических решений.

Как известно, транспортировка товаров с помощью морских судов – это оптимальный выбор, который существенно превосходит по экономической эффективности железнодорожные, автомобильные и тем более авиаперевозки. Учитывая наличие в рассматриваемом регионе необходимой структуры для приёма грузовых судов, рациональным решением возникшей проблемы видится обеспечение региона ресурсами через Балтийское

© Подкорытов П.Д., Овчинников К.Д. 2026

море, используя в качестве пунктов отправления порты, расположенные в Ленинградской области и городе Санкт-Петербурге: Большой порт Санкт-Петербург, Усть-Луга, Приморск, Высоцк и Выборг. В то же время, принимать поставки будут порты Калининградской области Балтийск и Пионерский, который, по сообщениям СМИ, будет полноценно сдан в эксплуатацию в ближайшее время.

На линии Санкт-Петербург – Калининград курсируют грузовые и грузопассажирские суда различного назначения. Однако для обеспечения контейнерного грузооборота по мере роста спроса на линию стихийно «выдёргиваются» суда с других маршрутов, что является экстренной мерой и отрицательно влияет на обеспечение перевозок. Это подтверждается периодически появляющимися в инфополе новостями, например, [1].

Таким образом, проблема оптимизации состава транспортного флота на линии Санкт-Петербург-Калининград является актуальной и нуждается в решении.

Поскольку транспортное судно создаётся, чтобы приносить прибыль, была поставлена задача определить оптимальный состав линии по экономическому критерию. В ходе своей работы контейнерные суда подвержены влиянию множества случайных факторов, среди которых можно выделить:

- погодные условия;
- степень загрузки;
- скорость грузообработки;
- простои ввиду загруженности портов.

Все упомянутые факторы напрямую влияют на провозоспособность судна, а, следовательно, и на его эффективность. Нужно также сказать, что срок службы транспортных судов составляет примерно 25 лет, что означает примерно четырёхзначное число рейсов, учитывая протяжённость рассматриваемой линии. Таким образом, указанные случайные факторы при их некорректном учёте могут привести к критической неточности результата исследования.

Принимая во внимание изложенное, в исследовании были применены методы имитационного моделирования, особенностями которых являются учёт случайных факторов и неопределённостей и возможность многократного экспериментирования.

Методы имитационного моделирования позволяют эффективно оптимизировать различные процессы. В России в 2011 году создано Национальное общество имитационного моделирования [2], под эгидой которого регулярно проводятся конференции, на которых презентуют различные исследования в этой области, в том числе обзорного типа [3].

Имитационное моделирование успешно применяется при решении задачи оптимизации проектирования судов на базе прогнозирования работы флота на маршрутных линиях [4]. Например, в работе [5] описывается детальная модель функционирования судна на регулярной линии, включающая поэтапные элементы рейса, текущие затраты и доходы с учётом региональных и гидрометеорологических условий, по результатам работы которой предложены способы оптимизации системы морских пассажирских перевозок на островные направления г. Владивостока. В статье [6] описана имитационная модель поставок сжиженного природного газа в г. Мурманск морским транспортом, учитывающая ветро-волновые режимы на участках маршрутов. Описанная в работе [7] модель позволяет обеспечить эффективную работу контейнерной судоходной линии на Транскаспийском маршруте.

Имитационные модели так же успешно применяются для описания работы портов, грузовых терминалов и перевалочных пунктов. Методические основы и пример применения имитационного моделирования для указанной задачи представлены в работе [8]. Модель из исследования [9] направлена на интеграцию логистических и таможенных операций в морском порту и позволяет оптимизировать взаимодействие судоходных линий и терминала. В статьях [10, 11] показаны примеры имитационного моделирования с использованием программного обеспечения AnyLogic.

Некоторые имитационные модели направлены на учет узкоспециализированных особенностей маршрута, например, толщины и характеристик ледовых условий [12], или судна, например, при установке вспомогательных движителей, работающих на энергии ветра [13].

Таким образом, применение методов имитационного моделирования является подходящим инструментом для решения поставленной в настоящем исследовании задачи.

Описание имитационной модели

В рамках настоящей работы была разработана имитационная модель работы контейнерного судна на линии Санкт-Петербург-Калининград. Модель была составлена на языке Python посредством командного интерпретатора Shell. Результатом работы модели является определение провозоспособности судна с заданными характеристиками (входные данные – скорость хода v (уз) и контейнеровместимость capacity (TEU)) на протяжении периода времени в 10 лет с 2030 по 2039 год. Выходные данные работы модели:

- число перевезенных контейнеров G, TEU,
- время в пути $t_п$, мин,
- время маневров $t_м$, мин,
- время погрузо-разгрузочных работ $t_{ппр}$, мин.

Круговой рейс транспортного судна при работе на линии Санкт-Петербург – Калининград был разбит на 10 этапов:

1) погрузка в порте Санкт-Петербург;
2) манёвры в порте и фарватере (порт Санкт-Петербург);
3) путь по маршруту Санкт-Петербург-Калининград;
4) манёвры в фарватере и порте (порт Калининград);
5) разгрузка в порте Калининград;
6) погрузка порожних контейнеров в порте Калининград (опционально);
7) манёвры в порте и фарватере (порт Калининград);
8) путь по маршруту Калининград-Санкт-Петербург;
9) манёвры в фарватере и порте (порт Санкт-Петербург);
10) разгрузка порожних контейнеров (опционально).

Представленные этапы можно разделить на три функциональные группы, внутри каждой из которых моделирование процессов было идентичным:

1) этапы № 1, 5, 6, 10 – группа «Погрузо-разгрузочные работы»;

2) этапы № 2, 4, 7, 9 – группа «Манёвры»;

3) этапы 3, 8 – группа «Путь».

В рамках работы средняя скорость погрузки и разгрузки фидерных контейнеровозов была принята равной $\bar{t} = 1$ TEU/мин. Загрузка судна меняется от рейса к рейсу и является случайной величиной. В модели загрузка судна задаётся как нормально распределённая усечённая величина со следующими параметрами: средняя загрузка 72.5 % от контейнеровместимости, стандартное отклонение 10 % от контейнеровместимости, значение лежит на отрезке [0; capacity]. Таким образом, время погрузо-разгрузочных работ $t_{\text{ппр}}$, мин, можно оценить как:

$$t_{\text{ппр}} = capacity_{\text{факт}} \cdot \bar{t},$$

где $capacity_{\text{факт}}$ – фактическая загрузка судна, TEU.

Время маневрирования в порте и фарватере также считается нормально распределённой усечённой случайной величиной со следующими параметрами: среднее значение 60 мин, стандартное отклонение 6 мин, значение лежит в интервале [30; +∞).

Расстояние между портами Санкт-Петербург и Калининград согласно [14] составляет 568 морских миль. Единственным фактором, влияющим на скорость судна при переходе между портами, была принята высота волны 3% обеспеченности. Деление Балтийского моря на районы согласно [15] и примерный маршрут следования судна представлен на рис. 1.

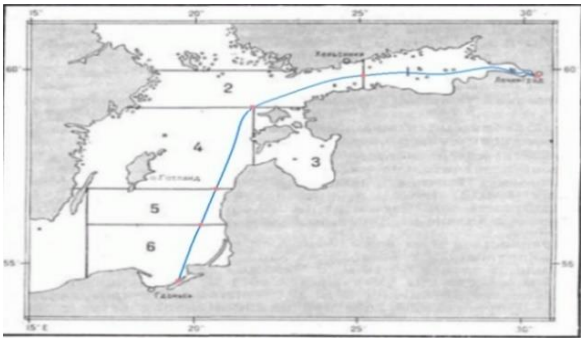


Рис. 1. Районирование Балтийского моря и маршрут следования

Зная общий путь по маршруту, по рис. 1 можно определить составные части пути по районам моря:

- район 1 – 174.8 морских миль,
- район 2 – 118.7 морских миль,
- район 4 – 130.2 морских миль,
- район 5 – 56.7 морских миль,
- район 6 – 87.5 морских миль.

Данные по повторяемости высот волн указаны в [15].

Для определения влияния высоты волны на скорость судна была использована методика из пособия [16], согласно которой дополнительное сопротивление на нерегулярном волнении определяется по формуле, кН:

$$R_{AW} = C_s Fr^{0.687} h^{2.5} f(\alpha),$$

где $C_s = 2.77 \cdot 10^5 \rho g \left(\frac{B^2}{L^{1.5}}\right)(1 + 4.4\delta)$,

$\alpha = 0.252 Fr^{0.143} \sqrt{\frac{L}{h}}$,

$f(\alpha) = \left(\frac{\alpha}{e^{\alpha}}\right)^{12.4}$.

Поскольку на данном этапе построения модели данных для такого расчёта недостаточно, было принято решение проанализировать, как высота волны 3% обеспеченности влияет на скорость хода судна-прототипа. В качестве такого судна был принят фидерный контейнеровоз TS Mawei контейнеровместимостью 1100 TEU [17].

Методом Холтропа [18] был произведён расчет сопротивления судна-прототипа на тихой воде, и получена его кривая сопротивления. Затем в табличной форме произведён расчёт дополнительного сопротивления на нерегулярном волнении для диапазона высот волн 3% обеспеченности [0;8] м с шагом 0.1 м. Затем по этим данным и кривой сопротивления для каждой высоты волны была получена достижимая скорость хода. В реальной практике при экстремально высоких волнах капитан может принять решение переждать плохую погоду, однако в работе принято допущение о том, что судно будет продолжать движение при любых вероятных условиях волнения. Итоги расчёта представлены в графическом виде на рис. 2.

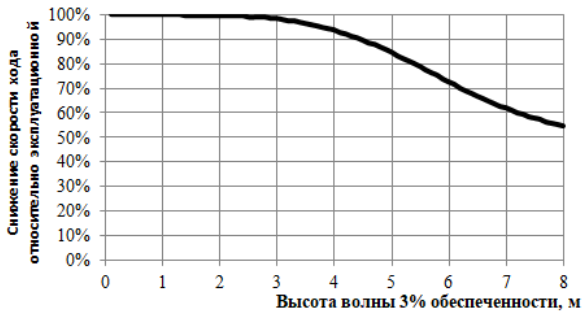


Рис. 2. Снижение скорости хода судна-прототипа в зависимости от высоты волнения

Принимая отношение достижимой скорости на волнении к полной скорости на тихой воде одинаковым для прототипа и проекта, оценивается влияние высоты волны на скорость судна, а тем самым на время в пути.

Таким образом, зная текущий месяц и район моря, по данным рис. 1 определяется высота волны 3% обеспеченности. Зная высоту волны 3% обеспеченности, рассчитывается скорость хода. Высота волны в модели пересчитывается каждые 30 мин. При этом введено ограничение, согласно которому за 30 мин высота волны не может измениться больше, чем на 3.5 м.

Учитывая изложенное выше, была составлена блок-схема алгоритма имитационного моделирования, представленная на рис. 3.

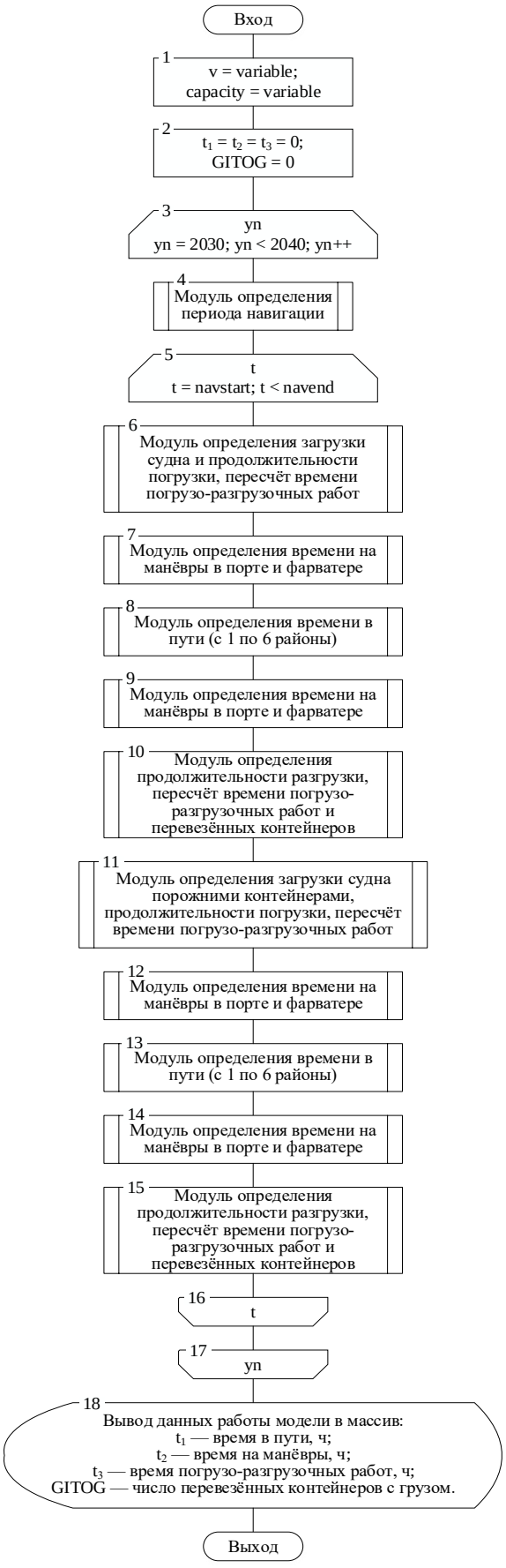


Рис. 3. Блок-схема алгоритма имитационной модели

В этой схеме в блоках 1 и 2 задаются варьируемые параметры и вспомогательные переменные. В блоках с 3 по 17 описывается зацикленная последовательность расчёта искомых выходных параметров, а затем в блоке 18 эти данные выводятся в массив.

В модели рассматриваются суда без ледового класса, продолжительность их навигации ограничена погодным фактором. Начало и окончание навигации также считаются случайными величинами. В рамках модели было принято, что неограниченная навигация на рассматриваемом маршруте начинается в диапазоне от 1 до 30 марта (среднее ожидаемое значение 15 марта), а заканчивается с 20 ноября по 20 декабря (среднее ожидаемое значение 5 декабря).

Определение потребного грузопотока

Для задания исходных данных потребного грузооборота между портами Калининграда и Санкт-Петербурга были использованы справочные данные о грузообороте в морском порту Калининград (каботаж), полученные от организации ФГБУ «Администрация морских портов Балтийского моря».

Данные были условно обработаны (условно, поскольку реальные сведения доподлинно неизвестны) и проиндексированы до 2040 г. Индексация производилась в соответствии с прогнозом увеличения грузооборота на ~30 % до 2030 г. и далее по классическим оценкам базового экономического роста в районе ~5 % [19].

В результате был принят ожидаемый потребный грузооборот на рассматриваемой линии, равный ~2.23 млн TEU за период с 2030 по 2039 гг.

Результаты моделирования

Как было указано ранее, входными переменными модели являются скорость хода и контейнеровместимость. Учитывая проектные ограничения и статистические данные, диапазоны входных переменных были определены как [15.5;20] с шагом 0.5 для скорости (уз) и [600;2300] с шагом 100 для контейнеровместимости (TEU), как это принято в классическом методе вариаций. Таким образом, образовалось 180 вариантов комбинаций входных параметров. Для каждой комбинации была произведена работа модели 101 раз для получения объективной картины. После этого были выделены пессимистичный и медианный сценарии по количеству перевезённых контейнеров. Пример итогов работы модели для скорости 17 уз и возможных вариантов контейнеровместимости представлен на фрагменте базы данных, показанной в табл. 1.

Таблица 1

Фрагмент базы данных, полученной по результатам моделирования для скорости хода 17 уз

TEU	Пессимистичный сценарий				Медианный сценарий			
	G, TEU	$t_п$, ч	$t_м$, ч	$t_{прр}$, ч	G, TEU	$t_п$, ч	$t_м$, ч	$t_{прр}$, ч
600	296555	45185	2749	14852	303996	45792	2778	15307
700	330854	42968	2616	16873	339948	43807	2665	16871
800	366285	41264	2521	18761	375040	42305	2573	18815
900	397214	40785	2480	20010	407251	41105	2514	20109
1000	423937	38830	2355	21762	437012	39404	2408	21913
1100	450520	37562	2279	22741	464495	38480	2336	23087
1200	477492	36187	2204	24133	491139	37422	2273	24457
1300	504923	35408	2146	25970	516930	35789	2180	25793
1400	522275	34094	2071	26952	537772	34805	2117	26833
1500	543426	33104	2012	27876	560663	33956	2064	28386
1600	563443	32442	1977	28829	581601	33142	2021	28778
1700	584526	31249	1897	29511	599898	32304	1959	30253
1800	601591	30731	1871	30614	619731	31249	1906	30973
1900	620122	30010	1830	31981	635483	30779	1875	31729
2000	635532	29030	1764	32783	654151	29794	1821	32226
2100	636822	27584	1673	33208	668264	29141	1763	33347
2200	661674	27634	1686	33499	683724	28176	1717	35220
2300	672627	26865	1636	35247	700548	27816	1690	34620

В описываемом исследовании потребное количество судов в серии для любой комбинации скорости и контейнеровместимости как при пессимистичном, так и при медианном сценариях оказалось примерно одинаковым. Для дальнейших расчетов были приняты результаты по медианному сценарию.

Интерпретация результатов моделирования

Для каждой комбинации параметров скорость хода и контейнеровместимость определено количество судов, обеспечивающих заданных грузопоток, что показано в табл. 2.

Таблица 2

Требуемое количество судов в серии в зависимости от вместимости и скорости

TEU	Скорость хода, уз									
	15.5	16	16.5	17	17.5	18	18.5	19	19.5	20
600	9	8	8	8	8	8	8	8	7	7
700	8	8	7	7	7	7	7	7	7	7
800	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6
900	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
1000	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5
1100	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5
1200	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
1300	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
1400	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4
1500	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4
1600	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4
1700	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4
1800	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
1900	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2000	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2100	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2200	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2300	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Поскольку доход для любого состава линии примерно одинаков (грузопоток не изменяется), для достижения наилучших показателей прибыли, критерием оптимальности был выбран минимум приведённых затрат, включающих в себя построечные и эксплуатационные расходы.

Известные формулы определения построечной стоимости обычно исходят от водоизмещения порожнём и экономических показателей в рассматриваемом регионе. Например, в книге [20] предлагается такой подход, млн у.е.:

$$C_{\text{постр}} = C_{\text{мат}} + C_{\text{труд}} + C_{\text{приб}} = 1.1\left(f_{\text{к}}\left(P_{\text{к}} + 0.95{P_{\text{к}}}^{0.75}\right) + f_{\text{об}}{P_{\text{об}}}^{0.95} + f_{\text{мо}}{N_{PS}}^{0.82} + 200\left(P_{\text{к}} + 0.95{P_{\text{к}}}^{0.75}\right)^{2/3}\frac{L^{1/3}}{C_b} + 1100{P_{\text{об}}}^{2/3} + 120{N_{PS}}^{0.82}\right),$$

где $C_{\text{мат}}$, $C_{\text{труд}}$ и $C_{\text{приб}}$ – стоимость материалов, трудозатраты и прибыль верфи соответственно,

$f_{\text{к}}$, $f_{\text{об}}$ и $f_{\text{мо}}$ – стоимость корпусных конструкций, насыщения и оборудования машинного отделения соответственно,

$P_{\text{к}}$, $P_{\text{об}}$ и N_{PS} – масса корпуса, масса насыщения (оборудования) и мощность энергетической установки (в германских л.с.) соответственно,

L и C_b – длина и коэффициент общей полноты судна соответственно.

Для использования в математической модели предложенная формула была аппроксимирована и упрощена так, чтобы получать ориентировочное значение построечной стоимости на основании только контейнеровместимости судна. Для составления формулы использовался генеративный искусственный интеллект, предоставленный в открытом доступе сервисом Алиса AI [21]. В результате, построечная стоимость одного судна, млн у.е., определяется по формуле:

$$C_{\text{постр}} = 0.03 \cdot capacity^{0.875}.$$

В математическую модель формула была введена со множителем 10/25, который отражает рассмотрение десятилетнего периода эксплуатации новых судов из 25-летнего срока службы. Также было учтено снижение построечной стоимости по мере роста количества судов в серии: при серии от двух до четырех судов – на 15 %, и при серии больше четырех судов – на 20 %.

Эксплуатационные расходы складываются из фонда оплаты труда экипажа, административных расходов, затрат на ремонт и стоимости топлива.

Численность экипажа определена по формуле из [22], чел:

$$N_{\text{эк}} = 6.1 * \left(\frac{DW}{1000}\right)^{0.25} + 3.546 * \left(\frac{N}{1000}\right)^{0.25} + 1.8,$$

где DW, N – дедвейт судна в тоннах и мощности главного двигателя в кВт, определяемые по статистическим данным для фидерных контейнеровозов.

Деление экипажа по уровню должности и их месячные зарплаты приняты следующими:

- капитан – 1 чел, 2270 у.е./мес,
- старший комсостав – 3 чел, 1780 у.е./мес,
- младший комсостав – 3 чел, 1400 у.е./мес,
- рядовой состав – остальные члены экипажа, 1020 у.е./мес.

Затраты на зарплату экипажа рассчитываются за 10 лет, учитывая работу на судне в две смены.

Административные расходы учитывают корабельный сбор, плату за обработку контейнеров и ставка за стоянку судна в порте.

Корабельный сбор зависит от числа заходов в порт, ставок корабельного сбора в портах СПб и Калининград и валовой вместимости судов. Валовая вместимость определялась по формуле из [23], рег.т:

$$GT = 0.0024 \cdot capacity^2 + 3 \cdot capacity + 5500.$$

Количество рейсов было определено в ходе моделирования. Для прочих потребных в ходе расчётов параметров были приняты следующие значения:

- ставка корабельного сбора в порте Калининград – 0.04 у.е./рег.т;
- ставка корабельного сбора в порте Санкт-Петербург – 0.02 у.е./рег.т;
- стоимость обработки одного контейнера в порте Калининград – 7.8 у.е./TEU;
- ставка за стоянку портах Калининград и Санкт-Петербург – 2.6 у.е./час.

Таким образом, для каждой комбинации параметров скорость и контейнеровместимость были определены административные расходы.

Среднегодовые затраты на ремонт могут быть определены по эмпирической зависимости, млн у.е. [20]:

$$C_{\text{рем}} = 0.02 C_{\text{постр}}.$$

Однако в модель была введена другая формула, разработанная с использованием генеративного искусственного интеллекта Алиса AI [21], в которой учитывается контейнерная вместимость судна, млн у.е.:

$$C_{\text{рем}} = A + B \cdot capacity,$$

где A – базовые затраты на ремонт в год, B – переменные затраты на ремонт в год.

В рамках модели значения A и B были приняты следующими в зависимости от контейнеровместимости судна:

- для судов вместимостью от 600 до 1000 TEU – A = 123500 у.е./год, B = 13 у.е./TEU,
- для судов вместимостью от 1100 до 1500 TEU – A = 195000 у.е./год, B = 17.5 у.е./TEU,
- для судов вместимостью от 1600 до 2300 TEU – A = 279500 у.е./год, B = 21.5 у.е./TEU.

В качестве топлива судовых энергетических установок был принят морской дизель, стоимость которого задана равной 708.5 у.е./т.

Результаты работы модели включают количество часов в пути, время на погрузо-разгрузочные работы и на манёвры в порту и фарватере. Приняв расход топлива на полной мощности, то есть в пути, равным 175 гр/(кВт·ч) и пересчитав по формуле адмиралтейских коэффициентов ориентировочную мощность главного двигателя, определяется ожидаемый расход топлива. Расход топлива во время манёвров принят в размере 30 % от расхода на полном ходу. Расход топлива при погрузо-разгрузочных операциях определяется по формуле, т/ч [22]:

$$g_{\text{стоянка}} = 0.0083 \cdot N^{0.59}/24.$$

Итоговый график зависимости приведённых затрат от скорости хода и контейнеровместимости для рассмотренной задачи представлен на рис. 4.

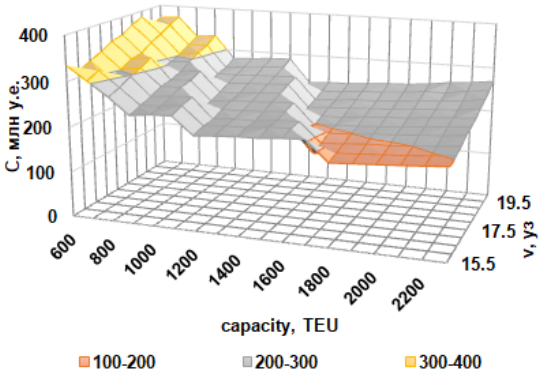


Рис. 4. Зависимость приведённых затрат от скорости хода и контейнеровместимости

Оптимальной по выбранному критерию стала серия из четырех судов контейнеровместимостью 1800 TEU и скоростью хода на чистой воде 15.5 уз.

Структура приведённых затрат для этой серии судов показана на рис. 5.

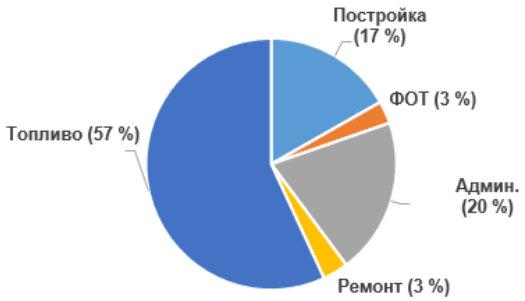


Рис. 5. Структура приведённых затрат для оптимальной серии судов

Чтобы оценить адекватность полученных результатов, можно обратиться к моделям, разработанным другими авторами. Например, используя модель из работы [24], учитывая полученные данные об оптимальной серии судов для рассматриваемой линии и представленного грузопотока, расчетное необходимое количество судов в серии – три. Это решение выглядит более оптимистично, чем результат, полученный в ходе настоящей работы. Причина, вероятно, заключается в том, что модель, представленная в настоящей работе, более насыщенная и учитывает, в том числе, ветро-волновые условия на маршрутной линии.

Заключение

В результате работы была определена оптимальная серия контейнерных судов для обслуживания линии Санкт-Петербург-Калининград с 2030 по 2039 годы. Ключевыми методами работы стали методы имитационного моделирования и метод вариаций.

Главным недостатком модели является использование приближённых формул для определения многих величин, влияющих на итоговые расчёты: грузопоток, административные расходы, затраты на ремонт и тому подобное.

Тем не менее, организации, которым потенциально пригодится модель, обладают всеми ресурсами, чтобы уточнить все зависимости расчёта.

Преимуществом модели является её универсальность. Она применима для любого маршрута: как для вновь открываемых транспортных линий, так и при модернизации линий с учётом уже работающих судов.

Литература

1. С марта на линию Усть-Луга — Калининград выйдут теплоходы «СТК-1028» и «Онего». URL: https://kgd.ru/news/society/item/116748-s-marta-na-liniyu-ust-luga--kaliningrad-vyjdut-teplohody-stk-1028-i-onego (дата обращения: 05.05.2026).
2. Национальное Общество Имитационного Моделирования: Русский. URL: http://simulation.su/ru.html (дата обращения: 22.10.2025).
3. Долматов М.А., Макурин А.О. Применение имитационного моделирования в зарубежном судостроении: обзор мировой практики. Двенадцатая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2025). Труды конференции, Санкт-Петербург, 15-17 октября 2025 г. СПб.: АО «ЦТСС», 2025. С. 674-686.
4. Ksciuk J., Kuhlemann S., Tierney K., Koberstein A. Uncertainty in maritime ship routing and scheduling: A Literature review. European Journal of Operational Research, 308 (2023): 499–524. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.08.006.
5. Новосельцев И.А., Китаев М.В. Оценка эффективности пассажирского судна с использованием методов имитационного моделирования. Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 4 (61). С. 40-53. https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-4/40-53.
6. Карпенко А.А. Имитационное моделирование эксплуатации морских транспортных средств с учетом ветро-волнового режима. Морские интеллектуальные технологии. № 2 том 1, 2021. С. 191-199. https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.027.
7. Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Шаров С.А., Ситов Д.А. Комплексная имитационная модель морской контейнерной линии на Транскаспийском маршруте. Транспортное дело России. – 2025. - № 5. – С. 112-119.
8. Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Щербакова-Слюсаренко В.Н. Имитационное моделирование в задачах анализа операций в морских портах. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.
9. Шаповалова М.А., Семенов А.Д. Имитационное моделирование системы взаимоотношений участников транспортно-логистического процесса на морском грузовом терминале. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 336–345. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-336-345.
10. Шевченко А.М., Дыда А.А. Обзор возможностей имитационного моделирования для оптимизации работы морского порта в среде AnyLogic. Computational Nanotechnology. 2024. Т. 11. № 1. С. 127–134. DOI: 10.33693/2313-223X-2024-11-1-127-134. EDN: EFMDDV.
11. Шевченко А.М. Обзор возможностей имитационного моделирования для оптимизации работы морского порта в среде AnyLogic: алгоритм разработки. Computational Nanotechnology. 2025. Т. 12. № 2. С. 82–97. DOI: 10.33693/2313-223X-2025-12-2-82-97, EDN: QSQYPQ.
12. Topaj A., Tarovik O. Ship route planning in simulation models of Arctic transport systems. 26th International Conference on Harbor, Maritime and Multimodal Logistic Modeling & Simulation, HMS 2024. doi: 10.46354/i3m.2024.hms.006.
13. Sun,W.; Tang, S.; Liu, X.; Zhou, S.;Wei, J. An Improved Ship Weather Routing Framework for CII Reduction Accounting for Wind-Assisted Rotors. J. Mar. Sci. Eng. 2022, 10, 1979. https://doi.org/ 10.3390/jmse10121979.
14. DeckOfficier. URL: https://deckofficer.ru/ (дата обращения: 22.10.2025).
15. Электронный атлас «Климат морей России и ключевых районов Мирового океана». Российский национальный Центр океанографических данных ГУ «ВНИИГМИ-МЦД». Авторы: Баталкина С.А., Белинских А.Л., Воронцов А.А., Михайлов Н.Н, Нефедова Г.И., Олейников С.А., Перескоков А.И., Ульянич И.Г., Хачатуров О.Х. URL: http://www.esimo.ru/atlas/index_atlas.html (дата обращения: 09.02.2026).
16. Жинкин В.Б., Качанов И.В., Товстых И.Е. Теория корабля. Ходкость судна. Методическое пособие для проведения практических занятий по дисциплине «Теория корабля». Минск: БНТУ, 2009. 54 с.
17. Significant Ships of 2023, London: The Royal Institution of Naval Architects, 2024. 108 p.
18. Holtrop J. A statistical re-analysis of resistance and propulsion data. International Shipbuilding Progress, 28 (363), 1984, pp. 272-276.
19. Рост экспортного потенциала Балтики в поисках баланса портовой и железнодорожной инфраструктуры. Март 2025. URL: https://econ.lenobl.ru/media/uploads/userfiles/2025/04/17/Доклад.pdf (дата обращения: 06.05.2026).
20. Roh M., Lee K.Y. Computational Ship Design. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2018. 531 p.
21. Алиса AI для решения реальных задач. URL: https://alice.yandex.ru/ (дата обращения 18.01.2026).
22. Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих судов. В 2 т. Т. 1. Описание системы «Корабль». – С-Пб: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. 819 с.
23. Овчинников К.Д., Васильев А.А. Анализ проектных характеристик современных судов-контейнеровозов. Транспортное дело России. 2024. № 1. С. 151-153.
24. Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Семенов А.Д. Расчет флота и парка контейнерного оборудования судоходной линии. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 539–547. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-539-547.

References

1. С марта на линию Усть-Луга — Калининград выйдут теплоходы «СТК-1028» и «Онего». URL: https://kgd.ru/news/society/item/116748-s-marta-na-liniyu-ust-luga--kaliningrad-vyjdut-teplohody-stk-1028-i-onego (05.05.2026).
2. Национальное Общество Имитационного Моделирования: Русский. URL: http://simulation.su/ru.html (22.10.2025).
3. Dolmatov Mikhail A., Makurin Artemy O. Application of simulation in international shipbuilding: A review of global practices. Dvenadtsataya vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya po imitatsionnomu modelirovaniyu i ego primeneniyu v nauke i promyshlennosti «Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika» (IMMOD-2025) [The twelfth All-Russian Scientific and practical Conference on simulation modeling and its application in science and industry "Simulation modeling. Theory and Practice" (IMMOD-2025)]. Proceedings of the conference, St. Petersburg, October 15-17, 2025. St. Petersburg: JSC "CTCC", 2025. pp. 674-686. [in Russian].
4. Ksciuk J., Kuhlemann S., Tierney K., Koberstein A. Uncertainty in maritime ship routing and scheduling: A Literature review. European Journal of Operational Research, 308 (2023): 499–524. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.08.006.
5. Novoseltcev I.A., Kitaev M.V. A simulation-based assessment of passenger vessel effectiveness. FEFU: School of Engineering Bulletin, 2024, no. 4(61), pp. 40–53. (In Russ.).
6. Karpenko A.A. Simulation of marine vehicles operation in the state of wind and wave conditions. Marine intellectual technologies. № 2 part 1, 2021. Pp. 191-199 [in Russian]. https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.027.
7. Kuznetsov A., Kirichenko A., Sharov K., Sitov A. Integrated simulation model of a sea container line on the transcaspian route. Transport business in Russia. № 5 2025. Pp. 112-119 [in Russian].
8. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko Simulation in the tasks of sea port operational analyses." Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova 10.2 (2018): 259–274 [in Russian]. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.
9. Shapovalova, Maria A., and Anton D. Semenov Simulation modeling of the system of relations between the participants of the transport and logistics process at the sea cargo terminal. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova 14.3 (2022): 336–345 [in Russian]. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-336-345.
10. Shevchenko A.M., Dyda A.A. An Overview of the Simulation Capabilities for Optimizing the Operation of the Seaport in the AnyLogic Environment. Computational Nanotechnology. 2024. Vol. 11. No. 1. Pp. 127–134. (In Rus.). DOI: 10.33693/2313-223X-2024-11-1-127-134. EDN: EFMDDV.
11. Shevchenko A.M. Overview of Simulation Modeling Capabilities for Optimizing Seaport Operations in AnyLogic: A Development Algorithm. Computational Nanotechnology. 2025. Vol. 12. No. 2. Pp. 82–97. (In Rus.). DOI: 10.33693/2313-223X-2025-12-2-82-97. EDN: QSQYPQ.
12. Topaj A., Tarovik O. Ship route planning in simulation models of Arctic transport systems. 26th International Conference on Harbor, Maritime and Multimodal Logistic Modeling & Simulation, HMS 2024. doi: 10.46354/i3m.2024.hms.006.
13. Sun,W.; Tang, S.; Liu, X.; Zhou, S.;Wei, J. An Improved Ship Weather Routing Framework for CII Reduction Accounting for Wind-Assisted Rotors. J. Mar. Sci. Eng. 2022, 10, 1979. https://doi.org/ 10.3390/jmse10121979.
14. DeckOfficier. URL: https://deckofficer.ru/ (22.10.2025).
15. Elektronnyy atlas «Klimat morey Rossii i klyuchevykh rayonov Mirovogo okeana» [Electronic atlas "Climate of the seas of Russia and key regions of the World Ocean"]. Rossiyskiy natsional'nyy Tsentr okeanograficheskikh dannykh GU «VNIIGMI-MTsD». Autors: Batalkina S.A., Belinskikh A.L., Vorontsov A.A., Mikhaylov N.N, Nefedova G.I., Oleynikov S.A., Pereskokov A.I., Ul'yanich I.G., Khachaturov O.Kh. URL: http://www.esimo.ru/atlas/index_atlas.html (09.02.2026).
16. Zhinkin V.B., Kachanov I.V., Tovstykh I.E. Teoriya korablya. Khodkost' sudna [Theory of Ship. Ship propulsion]. Metodicheskoe posobie dlya provedeniya prakticheskikh zanyatiy po distsipline «Teoriya korablya». Minsk: BNTU, 2009. 54 s. [in Russian].
17. Significant Ships of 2023, London: The Royal Institution of Naval Architects, 2024. 108 p.
18. Holtrop J. A statistical re-analysis of resistance and propulsion data. International Shipbuilding Progress, 28 (363), 1984, pp. 272-276.
19. Rost jeksportnogo potenciala Baltiki v poiskah balansa portovoj i zheleznodorozhnoj infrastruktury [Growing Baltic export potential in search of a balance between port and railway infrastructure]. March 2025. URL: https://econ.lenobl.ru/media/uploads/userfiles/2025/04/17/Доклад.pdf (06.05.2026) [in Russian].
20. Roh M., Lee K.Y. Computational Ship Design. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2018. 531 p.
21. Алиса AI для решения реальных задач. URL: https://alice.yandex.ru/ (18.01.2026).
22. Gaykovich A.I. Teoriya proektirovaniya vodoizmeshchayushchikh sudov. Vol. 1. Opisanie sistemy «Korabl'» [Theory of displacement vessel design. Vol. 1. Description of the "ship" system]. – S-Pb: Izd-vo NITs MORINTEKh, 2014. 819 s. [in Russian].
23. Ovchinnikov K., Vasiliev A. The Design Parameters Analysis Of Modern Containerships. TRANSPORT BUSINESS IN RUSSIA, №1 2024, pp. 151-153. [in Russian].
24. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Anton D. Semenov Assessment of container ship and equipment fleet size. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova 13.4 (2021): 539–547 [in Russian]. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-539-547.

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

Подкорытов Павел Дмитриевич, студент магистратуры, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: ppodkorytov5@gmail.com

Pavel D. Podkorytov, master student, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: ppodkorytov5@gmail.com

Овчинников Кирилл Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: ovchinnikov_kd@mail.ru

Kirill D. Ovchinnikov, Ph.D. (Eng), associate professor, associate professor of the Ship Design Department, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: ovchinnikov_kd@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 19.02.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 24.05.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 10.06.2026.

Научная статья
УДК 629.5.01:004.94
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.027

Обоснование управляемых параметров цифрового информационного моделирования, влияющих на снижение затрат реализации проекта морского транспортного судна

Алиханов О.Э.[1] orhan.alihanov@gmail.com
[1]Севастопольский Государственный Университет

Аннотация. В статье рассматривается роль цифрового информационного моделирования (ЦИМ) в судостроении и его влияние на экономические показатели проектов судостроения. Даны определения ЦИМ и описаны преимущества её внедрения (повышение точности проектирования, качества, безопасности и снижение издержек). Проведён обзор зарубежного опыта применения ЦИМ в судостроении: анализируются практики создания «умных верфей» и цифровых двойников в Южной Корее, Германии, Норвегии и Китае. Приведены результаты научных исследований и экспериментов, показывающие снижение затрат и сроков при использовании ЦИМ: в том числе сокращение трудоёмкости работ (до 10–30 % на отдельных этапах) и снижение стоимости испытаний (по сравнению с экспериментальными методами – в 2–3 раза). Определены управляемые параметры ЦИМ, влияющие на стоимость и сроки проекта: параметрические модели, автоматизация трассировок, системы координации и обнаружения коллизий, цифровые двойники, управление версиями моделей и др. Приводятся примеры формул и гипотез, связывающих параметры ЦИМ с экономическими показателями (например, формула энергопотребления в контексте цифрового двойника). В качестве подтверждения демонстрируются результаты пилотных проектов, где внедрение ЦИМ привело к реальному сокращению затрат и рисков. Используются ссылки на отечественные и международные источники по теме.

Ключевые слова: цифровое информационное моделирование (ЦИМ), судостроение, цифровой двойник, BIM, снижение затрат, параметрическое моделирование, координация систем, коллизии, ROI, экономические показатели.
Для цитирования: Алиханов О.Э. Обоснование управляемых параметров цифрового информационного моделирования, влияющих на снижение затрат реализации проекта морского транспортного судна Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 31—35. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.027

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.027

Justification of Digital Information Modeling Controllable Parameters Affecting Cost Reduction in Marine Transport Vessel Project Implementation

Orkhan E. Alikhanov [1] orhan.alihanov@gmail.com
[1]Sevastopol State University

Abstract. This article examines the role of digital information modeling (DIM) in shipbuilding and its impact on the economic performance of shipbuilding projects. Definitions of DIM are provided and the advantages of its implementation (improved design accuracy, quality, safety, and cost reduction) are described. A review of international experience in applying DIM in shipbuilding is provided, analyzing the practices of creating "smart shipyards" and digital twins in South Korea, Germany, Norway, and China. The article presents the results of scientific research and experiments demonstrating cost and time reductions with the use of DIM, including a reduction in labor intensity (up to 10-30% at certain stages) and a reduction in testing costs (2-3 times compared to experimental methods). The paper identifies the controllable parameters of the CIM that impact project costs and schedules: parametric models, automated routing, coordination and collision detection systems, digital twins, model version management, and others. Examples of formulas and hypotheses linking CIM parameters to economic indicators are provided (for example, an energy consumption formula in the context of a digital twin). As evidence, the results of pilot projects are demonstrated, where the implementation of the CIM resulted in significant cost and risk reductions. References to relevant domestic and international sources are included.

Keywords: Digital information modeling (DIM), shipbuilding, digital twin, BIM, cost reduction, parametric modeling, systems coordination, collisions, ROI, economic indicators.
For citation: Orkhan E. Alikhanov Justification of Digital Information Modeling) Controllable Parameters Affecting Cost Reduction in Marine Transport Vessel Project Implementation. Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 31—35. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.027

Введение

Цифровое информационное моделирование (ЦИМ) становится ключевой технологией при проектировании и строительстве морских судов. Целью данной статьи является обоснование управляемых параметров ЦИМ, влияющих на снижение затрат реализации проекта морского транспортного судна. ЦИМ обычно определяется как

© Алиханов О.Э. 2026

объектно-ориентированная трёхмерная модель объекта, содержащая физические, функциональные и другие характеристики на всех этапах жизненного цикла судна [1]. В судостроении объединённая модель служит «единой правдой» для архитектурных, конструктивных и инженерных решений, обеспечивая интеграцию данных всех систем судна. Эффективность ЦИМ заключается в повышении точности расчётов и проектирования, улучшении качества и безопасности строительства, а также в сокращении затрат, связанных с переделками и эксплуатацией [1, 2]. Так, численное моделирование гидродинамики корпуса судна позволяет найти оптимальное соотношение между стоимостью и качеством решений, при этом расходы на расчётную модель в 2–3 раза ниже затрат на аналогичные экспериментальные исследования [2]. Переход на цифровые технологии проектирования (аналог BIM в строительстве) позволяет выявлять ошибки и «коллизии» на ранних этапах [1] и тем самым сокращать расходы на устранение дефектов и переделки. Введение ЦИМ также даёт возможность параллельного ведения работ (конструкторских, инженерных, монтажных) и ускоряет принятие решений на основе виртуальных прототипов. Все эти преимущества делают ЦИМ перспективным инструментом снижения затрат и сроков в судостроительных проектах.

Существующие практики внедрения ЦИМ в судостроении

В мировой практике судостроения ЦИМ и цифровые двойники (Digital Twin) всё активнее используются для оптимизации процессов. Южнокорейские судоверфи (Daewoo, Samsung и др.) создают «умные верфи» с цифровыми копиями судов и силовых установок [3]. Например, совместно с финской компанией Napa и немцами из AVL корейская судостроительная компания DSME разработала цифровой двойник двигателя и судна для мониторинга и анализа работы в реальном времени [3]. Это позволяет заранее выявлять проблемы интеграции систем и предотвращать дорогостоящие задержки («before metal is cut») [4]. Подобная инициатива отражает глобальную тенденцию перехода к цифровой трансформации судостроения: создание виртуальных «тренажёров» для обучения экипажей и оптимизации технических решений приводит к более эффективной эксплуатации судов и снижению эксплуатационных рисков [3, 5].

В Европе и США также растёт интерес к цифровым верфям. К примеру, Dassault Systemes совместно с испанской верфью Navantia применяют 3D-моделирование для снижения неопределённости проектирования военных кораблей ВМС США [4]. Публикации отмечают, что использование виртуальных моделей по образцу Tesla или Airbus позволяет минимизировать проблемы сборки ещё до начала производства и сэкономить время и деньги на интеграции сложных систем. В Норвегии, где BIM-технологии традиционно широко распространены, цифровые модели также применяются для координации сложных нефтегазовых и кораблестроительных проектов. Одно исследование подчёркивает, что управление в реальном времени через цифровые двойники флота может «сократить операционные расходы, предотвратить аварии и дать информацию о поведении судна в любой момент времени» [5]. В Китае крупнейшие верфи и классификационные общества (например, CSS) разрабатывают цифровые двойники судов для мониторинга состояния корабельных систем [5]. Таким образом, мировой опыт внедрения ЦИМ в судостроении демонстрирует значительные преимущества: цифровая модель обеспечивает непрерывную интеграцию данных, ускоряет обнаружение ошибок и способствует снижению расходов на всех этапах жизненного цикла судна.

Определение управляемых параметров ЦИМ

На основе обзора литературы [1-8] можно выделить ключевые подходы и инструменты цифрового информационного моделирования, которые, являясь управляемыми параметрами внедрения ЦИМ, непосредственно влияют на стоимость и сроки проекта судна:

Использование параметрического моделирования корпуса и систем. Использование параметрических шаблонов (например, семейств элементов корпуса, отсеков, машинерии) упрощает изменение размеров и форм частей судна по целым наборам зависимостей. Параметрический подход даёт гибкость и ускоряет перебор вариантов, снижая время проектирования и вероятность ошибок при изменениях [6]. Специфические для судостроения модули автоматизации (например, генерация типовых секций корпуса или оптимизация шпангоутов) позволяют быстро адаптировать модель к новым требованиям и уменьшить трудозатраты на доработки.

Применение координации междисциплинарных систем (BIM-координация). Единая трёхмерная модель объединяет архитектурные, конструктивные, оборудованные и инженерные решения, что позволяет автоматически проверять их взаимодействие и выявлять пересечения (коллизии) конструкций, трубопроводов, кабелей и т.п. Еще на этапе проектирования проводится автоматическая проверка пересечений элементов [1]. Это предотвращает дорогостоящие переделки на верфи и повышает качество проекта в целом. Инструменты координации позволяют также согласовать несущие конструкции с компоновками машинного отделения и оборудованием, уменьшая накладки по пространству и материальным ресурсам.

Внедрение автоматизации трассировок трубопроводов и кабельных сетей. Современные САПР для судостроения содержат модули автоматического прокладывания систем коммуникаций. Автоматизированный расчёт трасс упрощает монтаж, снижает вероятность ошибок и гарантирует соблюдение технологических норм (например, минимальный радиус изгиба труб, расстояние до устройств). В результате экономится время инженерной проработки и монтажа.

Использование систем контроля версий и совместной работы (PLM/CDE). При проектировании судна участвует множество специалистов и подрядчиков. Системы управления данными проекта с версионным контролем позволяют отслеживать изменения моделей и

привязанных спецификаций [1], гарантируя, что все участники работают с актуальными данными. Это исключает расхождения и перепроектирование из-за устаревших чертежей.

Разработка и применение цифровых двойников и моделирования производственного процесса. Это развернутый виртуальный прототип судна с учётом динамики и эксплуатационных условий. Цифровой двойник используется не только для проектных расчётов, но и для моделирования сборки (планирование потока материалов и операций на верфи) и последующей эксплуатации (контроль технического состояния, планирование ТОиР). Например, Цифровой Двойник позволяет симулировать этап оснащения блока на верфи, определяя оптимальный момент и последовательность работ. В исследовании Кункеры и др. показано, что использование цифрового прототипа судна сместило значительную часть монтажных работ на стадию постройки секций (so-called on-block outfitting), что привело к сокращению трудозатрат на оснащение судна до 30 % в зависимости от профессии (среднее снижение ~10 % общего времени) [7]. При этом доля работ по сборке оборудования (труб, кабелей и т.п.) была перенесена раньше и выполнена под контролем виртуальной модели, что резко уменьшило число переделок. Цифровой двойник также даёт данные о потреблении ресурсов: в том же исследовании приведена формула расчёта энергопотребления (электросварочного оборудования, вентиляции и освещения) во время сборки судна, отражающая связь энергетических затрат и параметров конструкции судна. Подобные математические модели позволяют прогнозировать экономию за счёт внедрения ЦИМ (например, за счёт уменьшения рабочих часов или сокращения энергозатрат).

Связь параметров ЦИМ с экономическими показателями

Экономическая эффективность ЦИМ обычно оценивается через такие показатели, как ROI, окупаемость, снижение затрат и рисков. Грубо можно представить формулу окупаемости (ROI) внедрения ЦИМ как отношение прироста экономии к инвестициям в её внедрение. Например, если C_0 – стоимость строительства судна без ЦИМ, C_1 – стоимость с ЦИМ, а I – вложения в создание и сопровождение моделей, то экономию можно определить как $\Delta C = C_0 - C_1$, а $ROI = \frac{\Delta C}{I}$. Реальные исследования показывают существенные величины такого эффекта. По данным одного исследования строительства здания, применение BIM позволило сократить время на 50 % и снизить затраты на 52 % [8]

При сохранении аналогичных процессов в судостроении достигается похожий эффект: снижение количества ошибок, переделок и сокращение сроков поставки приводит к значительной экономии.

В курсе анализа проекта Кункеры предложена следующая модель энергопотребления EEC_{DT} в процессе оснащения судна с учётом Цифрового Двойника [7]:

$$EEC_{DT} = WH \times K_{arc} \times P_{WA} + \\ +\left((P_{LBL} + P_{FBL}) \times V \times D_{BL}\right) \times K_{NBBL} + \\ +(P_{LBO} + P_{FBO}) \times V \times D_{BO} \times K_{IBO} \times K_{CBO} \quad (1)$$

где учтены суммарные часы сварки WH, коэффициент эффективной работы дуги K_{arc}, мощность сварочного аппарата P_{WA}, мощность освещения и вентиляции P_{LBL}, P_{FBL} в помещениях до спуска на стапель, объём пространства V, длительности монтажных операций D_{BL}, D_{BO} (до и после спуска), а также коэффициенты, учитывающие неполный процесс и особенности вентиляции. Такая формула связывает параметры проекта (габариты секций, время монтажа, электрооборудование) с энергетическими затратами. На её основе можно оценивать экономию при изменении технологии (например, увеличении доли работ на блоках уменьшится D_{BO} и EEC_{DT}).

И хотя универсальных аналитических формул пока немного, существующие исследования однозначно показывают: с ростом степени цифровизации проекта (отдельные факторы ЦИМ) снижаются непроизводительные трудозатраты и ошибки. Например, при внедрении цифровых двойников ожидаемое сокращение затрат на жизненный цикл судна часто оценивается в 15–20 % по сравнению с традиционным подходом (с учётом обслуживания и модернизаций) [4, 5]. Крупные верфи оценивают окупаемость таких технологий в несколько лет, что подтвердилось в пилотных проектах.

Результаты экспериментов и пилотных внедрений

В практических проектах внедрение ЦИМ уже подтверждает свой экономический эффект. Так, анализ двух реальных сборочных проектов на одной верфи показал: за счёт применения 3D-модели и цифрового двойника *«круизного»* судна удалось сократить до 30 % трудозатрат на различные виды оснащения по сравнению с традиционной практикой «пассажирского» судна без такого прототипа [7]. Благодаря предварительному «виртуальному оснащению» на стадии сборки блоков резко сократилось число ошибок и переделок «на воде», особенно в слесарных и монтажных работах (до 90 %). В общей сложности на 10 % снизилось общее время отдела оснащения судна.

Другой пример – использование цифрового двойника двигателя на этапе швартовки и приемке судна. Компания DSME со встроенными в модель сенсорами двигателя и пропульсивной системы смогла обнаружить потенциальные проблемы в работе ещё до спуска судна на воду [3]. Это позволило сэкономить до нескольких сотен тысяч долларов за счёт избегания дорогостоящего демонтажа/ремонта на плаву и повторного запуска испытаний.

Более того, при цифровом моделировании отпадает необходимость большого числа физических прототипов и макетов. В судостроении высокие расходы обычно связаны с изготовлением опытовых моделей и их испытаниями в бассейнах. Исследования показывают, что виртуальные гидродинамические расчёты экономят в 2–3 раза средства по сравнению с экспериментами при схожем качестве результата [2]. Это снижает

исходную «базовую» стоимость проектирования корпуса.

Суммарно на основе различных кейсов можно утверждать, что внедрение ЦИМ и цифровых двойников приводит к многокомпонентному снижению затрат: меньшему числу ошибок (экономия на переделках), более быстрому выполнению работ (меньше зарплат и накладных расходов), сокращению затрат на испытания, а также снижению рисков при эксплуатации (что в совокупности уменьшает затраты жизненного цикла судна).

Выводы

Цифровое информационное моделирование (ЦИМ) становится неотъемлемым элементом судостроения, способствуя экономии времени и средств. ЦИМ-стратегия позволяет оптимизировать проектные решения за счёт параметрического моделирования, интеграции данных всех систем судна, автоматизации трассировок и проверки коллизий. Внедрение цифровых двойников усиливает эффект, переводя часть работ по сборке и испытаниям в виртуальную плоскость и давая возможность прогнозировать эксплуатационные затраты. На основании обзора можно выделить следующие ключевые параметры и гипотезы:

Параметры проектных моделей: степень параметризации корпуса и компонентов, полнота модели (сколько систем включено), уровень детализации элементов.

Параметры процессов: доля автоматизированных проверок (коллизий, спецификаций), степень предварительного «офлайнового» монтажа в модели.

Цифровые двойники: наличие настоящего цифрового двойника (с живыми данными) может снижать аварийность и ТОиР, что прямо влияет на стоимость владения судном.

Контроль версий: надёжная система управления изменениями позволяет минимизировать неучтённые корректировки.

Математические модели связывают эти параметры с затратами. Например, могут быть построены регрессионные зависимости: общая экономия $S = f(m_1, m_2, \ldots)$, где m_i — метрики зрелости ЦИМ (например, процент смоделированных конструкций, уровень автоматизации проверок и пр.). Также используются традиционные финансовые метрики (ROI, NPV). Экспериментальные результаты подтверждают значительные коэффициенты экономии: сокращение трудозатрат на 10–30 %, уменьшение времени проекта, снижение стоимости испытаний в несколько раз. Все это свидетельствует о том, что управляемые параметры ЦИМ реально влияют на экономику проекта.

В заключение можно отметить, что полноценное внедрение ЦИМ в судостроении требует не только освоения новых IT-инструментов, но и пересмотра технологий проектирования и производства. Тем не менее, накопленные зарубежные и отечественные наработки ясно показывают: инвестиции в ЦИМ окупаются за счёт экономии ресурсов и времени. Систематическое использование параметрического моделирования, координации и цифровых двойников в проектах морских судов позволяет добиться значительного снижения затрат, повышая при этом качество и надёжность готового судна.

Литература

1. Tangl. Цифровая модель объекта капитального строительства [Электронный ресурс] // Блог Tangl. 2024. 22 авг. URL: https://tangl.cloud (дата обращения: 21.01.2026).
2. Станков Б.Н., Печенюк А.В. Цифровые технологии в проектировании судов: использование комплекса FlowVision // САПР и графика. 2015. № 3. С. 18–23.
3. FreightWaves Staff. Port Report: Korean shipbuilder aims to develop "digital twins" [Electronic resource] // FreightWaves. 2019. 17 June. URL: https://www.freightwaves.com (accessed: 21.01.2026).
4. CACI. Digital Twin Design: Precision Modeling Saves Costs and Shrinks Delivery Timelines [Electronic resource] // CACI News. 2020. URL: https://www.caci.com (accessed: 21.01.2026).
5. Markopoulos E., Markopoulos P., Nandi A., Trivedi N., Huang J.Z., Raja P., Panayi N., Kossieri I. The Impact of Digital Twins Technology in Maritime Fleet and Safety Management [Electronic resource] // Maritime Technology and Research. 2023. URL: https://discovery.ucl.ac.uk (accessed: 21.01.2026).
6. Hasan R. Advancements in Automation & Parametric Modeling in Ship Design: Review of Current Technologies [Electronic resource] // Engineering: Open Access. 2024. Vol. 2, no. 5. P. 1–6. URL: https://opastpublishers.com (accessed: 21.01.2026).
7. Kunkera Z., Opetuk T., Hadžić N., Tošanović N. Using Digital Twin in a Shipbuilding Project // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, no. 24. 12721. DOI: 10.3390/app122412721
8. Sholeh M.N., Fauziyah S., Khasani R.R. Effect of Building Information Modeling (BIM) on reduced construction time-costs: a case study // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 202. 02012. DOI: 10.1051/e3sconf/202020202012

References

1. Tangl. Tsifrovaya model obyekta kapitalnogo stroitelstva [Digital model of a capital construction object]. Tangl Blog, 2024, August 22. Available at: https://tangl.cloud (accessed: 21.01.2026).
2. Stankov B.N., Pechenyuk A.V. Tsifrovye tekhnologii v proektirovanii sudov: ispolzovanie kompleksa FlowVision [Digital technologies in ship design: using the FlowVision package]. SAPR i grafika [CAD and Graphics], 2015, no. 3, pp. 18–23.
3. FreightWaves Staff. Port Report: Korean shipbuilder aims to develop "digital twins". FreightWaves, 2019, June 17. Available at: https://www.freightwaves.com (accessed: 21.01.2026).
4. CACI. Digital Twin Design: Precision Modeling Saves Costs and Shrinks Delivery Timelines. CACI News, 2020. Available at: https://www.caci.com (accessed: 21.01.2026).

5. Markopoulos E., Markopoulos P., Nandi A., Trivedi N., Huang J.Z., Raja P., Panayi N., Kossieri I. The Impact of Digital Twins Technology in Maritime Fleet and Safety Management. Maritime Technology and Research, 2023. Available at: https://discovery.ucl.ac.uk (accessed: 21.01.2026).
6. Hasan R. Advancements in Automation & Parametric Modeling in Ship Design: Review of Current Technologies. Engineering: Open Access, 2024, vol. 2, no. 5, pp. 1–6. Available at: https://opastpublishers.com (accessed: 21.01.2026).
7. Kunkera Z., Opetuk T., Hadžić N., Tošanović N. Using Digital Twin in a Shipbuilding Project. Applied Sciences, 2022, vol. 12, no. 24, 12721. DOI: 10.3390/app122412721.
8. Sholeh M.N., Fauziyah S., Khasani R.R. Effect of Building Information Modeling (BIM) on reduced construction time-costs: a case study. E3S Web of Conferences, 2020, vol. 202, 02012. DOI: 10.1051/e3sconf/202020202012.

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

Алиханов Орхан Эльдар оглы, аспирант 3 курса кафедры инновационного судостроения и технологии освоения шельфа, Институт радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем, Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, Российская Федерация, e-mail: orhan.alihanov@gmail.com

Orkhan E. Alikhanov, postgraduate student, 3rd year, Department of Innovative Shipbuilding and Shelf Development Technologies, Institute of Radioelectronics and Intelligent Technical Systems, Sevastopol State University, Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: orhan.alihanov@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 23.01.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 14.02.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 15.02.2026.

Обзорная статья
УДК 621.43.052:621.433.2
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.028

Сравнительный анализ стратегий позднего и раннего цикла Миллера в обеспечении топливной гибкости судовых газовых двигателей

Антропова М.В.[1,2] m.loginova@aorumo.ru
[1]Волжский государственный университет водного транспорта, [2]РУМО

Аннотация. В статье представлен сравнительный анализ стратегий реализации цикла Миллера — позднего (LIVC) и раннего (EIVC) закрытия впускных клапанов — как инструмента повышения топливной гибкости судовых газовых двигателей. В условиях ужесточения экологических норм IMO и вариативности компонентного состава бункерного газового топлива критическое значение приобретает адаптация рабочего процесса к изменениям метанового числа. Проведенный систематический обзор выявил, что стратегия LIVC обеспечивает преимущество на номинальных режимах, повышая детонационную стойкость и индикаторный КПД (до 20 % при соответствующем наддуве), тогда как EIVC демонстрирует высокую эффективность на частичных нагрузках за счет снижения насосных потерь. Особое внимание в работе уделено экологическому аспекту — нелинейному влиянию снижения температуры в конце такта сжатия на проскок несгоревшего метана (methane slip). Обоснована необходимость дифференцированного подхода к выбору стратегии газораспределения в зависимости от эксплуатационного профиля судна (крейсерский или маневренный). Сформулирован вектор дальнейших исследований, направленный на разработку систем адаптивного управления фазами в реальном времени с использованием датчиков состава газа, что позволит оптимизировать рабочий процесс судовых энергетических установок.
Ключевые слова: судовой газовый двигатель, цикл Миллера, фазы газораспределения, LIVC, EIVC, метановое число, проскок метана, топливная гибкость.
Для цитирования: Антропова М.В. Сравнительный анализ стратегий позднего и раннего цикла Миллера в обеспечении топливной гибкости судовых газовых двигателей Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 36—45. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.028

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.028

Comparative analysis of late and early Miller cycle strategies for ensuring fuel flexibility of marine gas engines

Margarita V. Antropova [1,2] m.loginova@aorumo.ru
[1]Volga State University of Water Transport, [2]RUMO, Russian Federation

Abstract. The article presents a comparative analysis of Miller cycle implementation strategies — late (LIVC) and early (EIVC) intake valve closing — as a tool to enhance the fuel flexibility of marine gas engines. In the context of tightening IMO environmental regulations and the variability of bunker gas fuel composition, adapting the working process to changes in the methane number is of critical importance. A systematic review revealed that the LIVC strategy provides an advantage at nominal loads, increasing knock resistance and indicated efficiency (up to 20% with adequate turbocharging), while EIVC demonstrates high efficiency at partial loads by reducing pumping losses. Particular attention is paid to the environmental aspect — the non-linear effect of temperature reduction at the end of the compression stroke on methane slip. The necessity of a differentiated approach to the choice of the valve timing strategy depending on the vessel's operational profile (cruising or maneuvering) is substantiated. A vector for further research is formulated, aimed at developing adaptive real-time valve timing control systems using gas composition sensors, which will optimize the working process of marine power plants.
Keywords: marine gas engine, Miller cycle, valve timing, LIVC, EIVC, methane number, methane slip, fuel flexibility.
For citation: Margarita V. Antropova Comparative analysis of late and early Miller cycle strategies for ensuring fuel flexibility of marine gas engines Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 36—45. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.028

Введение

Ужесточение экологических норм Международной морской организации (IMO), включая введение зон контроля выбросов оксидов азота (NECA) и серы (SECA), а также требований по индексу энергоэффективности (EEXI) и рейтингу углеродоёмкости (CII), стимулирует судоходную отрасль к активному поиску альтернатив традиционному тяжелому топливу [2, 34]. Природный газ (в виде СПГ, СУГ или водородсодержащих смесей) рассматривается как одно из наиболее перспективных решений, позволяющих существенно снизить выбросы оксидов серы, твёрдых частиц и, при определённых условиях, углекислого газа. Согласно отраслевым прогнозам, рынок газовых двигателей для морского транспорта вырастет с 7,2 млрд долларов США в 2025 году до 12,9 млрд долларов к 2035 году, что подтверждает устойчивый интерес к газомоторным технологиям [21].

Однако широкому внедрению газового топлива препятствует его существенная неоднородность.

© Антропова М.В. 2026

Состав природного газа варьируется в зависимости от месторождения, способа получения и степени очистки, что напрямую влияет на его детонационную стойкость. Ключевой характеристикой в этом отношении является метановое число (МЧ) [29]. Для сжиженного природного газа (СПГ) метановое число обычно находится в пределах 80–95, для сжиженных углеводородных газов (СУГ, пропан-бутан) оно может опускаться до 30–60, а при добавлении водорода (перспективное направление для снижения углеродного следа) МЧ снижается ещё сильнее [31, 33]. Работа на топливе с низким метановым числом ведёт к детонации и риску повреждения цилиндропоршневой группы, тогда как использование топлива с высоким МЧ при работе на двигателе, оптимизированном под бедные смеси, вызывает падение мощности и ухудшение топливной экономичности. Таким образом, способность адаптироваться к переменному составу газового топлива становится критическим требованием к современным судовым энергетическим установкам.

Традиционные методы предотвращения детонации в газовых двигателях —обеднение смеси, запаздывание угла опережения зажигания или снижение давления наддува — неизбежно приводят к снижению индикаторного КПД и росту удельного расхода топлива [7, 29]. Более того, они не обеспечивают гибкой адаптации к изменению состава топлива в процессе эксплуатации, что особенно актуально для судов, работающих в разных регионах с различными источниками бункеровки. Альтернативным и значительно более эффективным подходом является использование термодинамического цикла Миллера [22]. Этот цикл, основанный на «укороченном сжатии», позволяет уменьшить эффективную степень сжатия ($\varepsilon_{эф}$) без изменения геометрической степени сжатия за счёт изменения момента закрытия клапанов газораспределения. В результате снижается температура рабочего тела в конце такта сжатия (T_c), что напрямую подавляет склонность к детонации, при этом степень расширения остаётся высокой, что позволяет сохранить или даже увеличить индикаторный КПД (повышение до 20% на номинальных режимах согласно [20]). Благодаря этому цикл Миллера позволяет существенно расширить допустимый диапазон метановых чисел, что является его ключевым преимуществом с точки зрения топливной гибкости [15, 29].

На практике цикл Миллера реализуется двумя основными стратегиями: поздним закрытием впускных клапанов (LIVC — Late Intake Valve Closing) и ранним закрытием впускных клапанов (EIVC — Early Intake Valve Closing) (Рисунок 1). При LIVC впускной клапан закрывается после нижней мёртвой точки (НМТ), часть заряда выталкивается обратно во впускной коллектор, что снижает насосные потери (по сравнению с дросселированием на впуске), но требует повышенного давления наддува для компенсации падения объёмной эффективности. При EIVC клапан закрывается до НМТ, и оставшийся в цилиндре заряд расширяется и охлаждается, что более эффективно снижает температуру в конце сжатия, однако может приводить к ухудшению турбулентности и замедлению фронта пламени [3, 18, 20, 32].

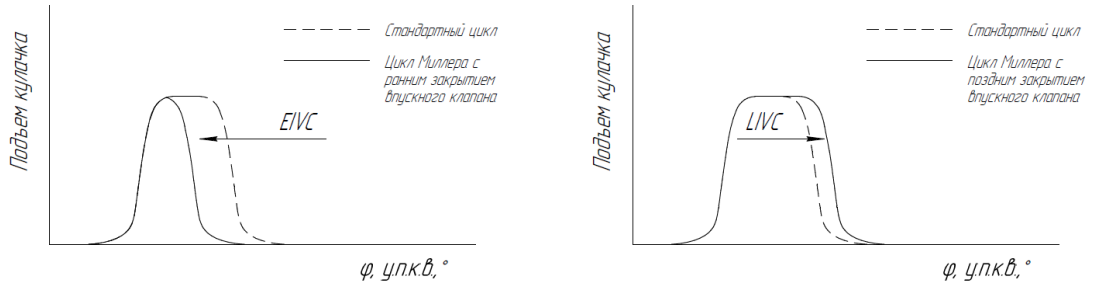


Рис 1. Стратегии реализации цикла Миллера

Наряду с детонацией серьёзной проблемой газовых двигателей является проскок метана (methane slip) — выброс несгоревшего метана с отработавшими газами. Метан является парниковым газом с глобальным потенциалом потепления (GWP), в 28–30 раз превышающим таковой для углекислого газа на 100-летнем горизонте [13]. Поскольку цикл Миллера снижает температуру в цилиндре (ключевой механизм подавления детонации), это может ухудшать условия для полного окисления метана, особенно в пристеночных зонах и зазорах. Однако данные литературы по этому вопросу противоречивы. С одной стороны, исследования [16] показывают, что чрезмерное опережение фаз при LIVC (особенно в условиях наддува) может приводить к росту проскока метана и падению крутящего момента. С другой стороны, [26] демонстрируют, что оптимизированная комбинация LIVC и RCCI-сгорания позволяет снизить эмиссию метана до 80% по сравнению с обычным двухтопливным режимом. Это противоречие требует отдельного анализа и является одним из фокусов настоящего обзора.

Целью данной работы является систематический сравнительный анализ двух стратегий цикла Миллера — LIVC и EIVC — применительно к судовым газовым двигателям. В обзоре рассматриваются термодинамические основы каждой стратегии, их влияние на детонационную стойкость и индикаторный КПД (с обобщением в сводной таблице), а также побочные эффекты в виде эмиссии оксидов азота (NOx) и проскока метана. На основе выявленных пробелов в современной литературе формулируются направления для дальнейших исследований, в том числе обоснована необходимость разработки методов адаптивного управления фазами газораспределения в реальном времени в зависимости от состава газового топлива.

Методология обзора

Для систематического сравнения двух стратегий цикла Миллера — позднего (LIVC) и раннего (EIVC) закрытия впускных клапанов — была разработана специальная методика, результаты которой обобщены в Таблице 1. Процедура включала четыре этапа:

На первом этапе для каждого параметра сравнения (детонационная стойкость, индикаторный КПД, удельный расход топлива (BSFC), NOx, methane slip, требования к наддуву и др.) выполнялся поиск релевантных количест-венных данных в отобранных источниках. Приоритет отдавался экспериментальным работам на газовых или двухтопливных двигателях; данные с бензиновых двигателей привлекались только для подтверждения фундаментальных закономернос-тей;

На втором этапе проводилось сравнение значений из разных источников для выявления диапазона и установления согласованных величин. Например, для повышения индикаторного КПД на номинальном режиме данные [20] и [18] показали близкие значения (около 20%), что позволило указать эту величину как характерную для LIVC;

На третьем этапе фиксировались противоречия в случаях, когда разные источники давали противоположные результаты. Наиболее яркий пример — влияние LIVC на methane slip: [16] показывают потенциальный рост при неоптимальном выборе фаз, а [26] — снижение при комбинации LIVC с RCCI-сгоранием (Reactivity Controlled Compression Ignition - реакционно-контролируемое воспламенение от сжатия). В таблице эти противоречия отражены соответствующими примечаниями и ссылками на оба полюса;

На четвёртом этапе выполнялось качественное обобщение для параметров, по которым количественные данные в литературе разрозненны или отсутствуют (например, «требования к системе наддува»). В таких случаях формулировка основана на общем мнении, выявленном при анализе нескольких источников [19, 20];

При интерпретации данных Таблицы 1 необходимо учитывать два ограничения. Во-первых, большинство количественных данных получено на бензиновых двигателях или автомобильных газовых двигателях. Перенос этих данных на судовые двигатели с большим диаметром поршня требует осторожности, но отражает общие термодинамические закономерности, подтверждённые в работах на судовых двигателях [8, 12, 30], в том числе при численном моделировании глубокого цикла Миллера для двигателя MAN 8L51/60DF [1]. Во-вторых, данные по утечкам метана в доступной литературе немногочисленны и противоречивы, что отмечено в таблице. Окончательные выводы по этому параметру требуют дальнейших экспериментальных исследований на судовых двигателях.

Результаты

Результаты систематического сравнения двух стратегий цикла Миллера — позднего (LIVC) и раннего (EIVC) закрытия впускных клапанов — обобщены в Таблице 1. В основу таблицы положены данные из экспериментальных и расчётных работ, отобранных в соответствии с методикой, описанной в разделе II. Для каждого параметра указаны характерные количественные значения (где это возможно) и ссылки на источники, при этом противоречия в литературе отражены с указанием обоих полюсов.

Таблица 1

Сравнение стратегий LIVC и EIVC цикла Миллера

Параметр	LIVC (Late Intake Valve Closing)	EIVC (Early Intake Valve Closing)
Принцип реализации	Закрытие впускного клапана после НМТ (на такте сжатия). Часть заряда выталкивается обратно во впускной коллектор [18,20]	Закрытие впускного клапана до НМТ. Заряд расширяется в цилиндре, создавая разрежение [18,20]
Эффективная степень сжатия	Умеренно снижается (зависит от угла задержки) [18,20]	Сильно снижается (чем раньше закрытие, тем ниже) [18,20]
Насосные потери (PMEP)	Выше, чем при EIVC (из-за возврата заряда) [17]	Ниже, чем при LIVC (меньше противодавление) [3,18]
Турбулентность заряда в цилиндре	Сохраняется на высоком уровне (близко к базовому циклу) [20, 32]	Снижается (раннее закрытие уменьшает завихрения) [3, 20, 32]
Детонационная стойкость	**Высокая** – LIVC эффективнее EIVC для подавления детонации [20,35]	Средняя [20]
Температура в конце сжатия (Tc)	Снижается умеренно [18, 20]	Снижается сильнее (за счёт расширения заряда) [18, 20]
Индикаторный КПД на номинальном режиме (высокая нагрузка)	**Повышение до 20%** (при 3000 об/мин, 20 бар BMEP) [18, 20]	Снижение или незначительное улучшение [18, 20]
Индикаторный КПД на частичных нагрузках	Снижается (недостаток наддува) [19]	**Повышается до 10%** (снижение насосных потерь) ([2, 17]
Удельный расход топлива (BSFC)	Снижается на высоких нагрузках (до -4.7% при ε =12.0) [18]	Снижается на низких нагрузках (до -7.4% при ε =12.0) [18, 19]
Термический КПД (теоретический)	Повышается за счёт увеличения степени расширения (при компенсации наддувом) [6, 24]	Повышается, но слабее [24]
Мощность / крутящий момент	Сохраняется на номинальном режиме (при достаточном наддуве). На малых оборотах – падает [20]	На малых нагрузках – может расти (снижение насосных потерь). На высоких – падает [9]

NOx эмиссия	**Снижение 15–25%** (за счёт снижения пиковой температуры) [15, 20, 25]	Снижение 10–15% [25]
Methane slip (проскок метана)	Противоречивые данные: возможен рост при неправильном выборе фаз [15] или снижение в комбинации с RCCI [26]	Тенденция к снижению (более полное сгорание) [16]
Требования к системе наддува	**Высокие** (требуется высокая степень повышения давления наддува для компенсации падения объёмной эффективности [19, 20]	Умеренные (меньшая потеря объёмной эффективности) [20]
Рекомендуемая область применения	**Номинальный режим, высокие нагрузки** (где есть достаточный наддув) [20]	**Частичные нагрузки, малый ход** (где важны насосные потери) [3, 27]

Представленные в таблице данные позволяют выделить несколько устойчивых закономерностей. LIVC обеспечивает более высокую детонационную стойкость и индикаторный КПД на номинальных режимах (до +20%), однако требует агрессивного наддува для компенсации падения объёмной эффективности и эффективен только при достаточном уровне наддува, что ограничивает его применение на малых оборотах [19, 20]. EIVC, напротив, даёт преимущество на частичных нагрузках за счёт снижения насосных потерь (повышение КПД до 10%) и не столь критичен к характеристикам наддува, но уступает LIVC в детонационной стойкости и турбулентности заряда [3, 27].

Сравнение по эмиссионным показателям показывает, что обе стратегии снижают выбросы NOx (LIVC на 15–25%, EIVC на 10–15%) за счёт снижения пиковой температуры сгорания [16, 26]. Влияние на проскок метана (methane slip) остаётся дискуссионным: одни авторы связывают LIVC с потенциальным ростом эмиссии метана при неоптимальных фазах газораспределения [16], другие демонстрируют снижение methane slip до 80% при комбинации LIVC с RCCI-сгоранием [26]. Этот вопрос требует дальнейших экспериментальных исследований на судовых двигателях.

Таким образом, выбор между LIVC и EIVC должен определяться режимом работы двигателя: LIVC предпочтителен для длительной работы на номинальных нагрузках, тогда как EIVC — для эксплуатации в переменных и частичных режимах, характерных для многих типов судов.

Обсуждение

Проведённый систематический анализ двух стратегий цикла Миллера — LIVC и EIVC — позволил выявить их принципиальные различия, области оптимального применения и ряд противоречий, требующих дальнейшего изучения. Представленный в Таблице 1 анализ количественных и качественных данных даёт возможность не только выбрать стратегию под конкретный режим работы, но и понять фундаментальные ограничения каждой из них.

Влияние цикла Миллера на полноту сгорания топлива

При анализе эффективности цикла Миллера важно учитывать связь между детонационной стойкостью и качеством сгорания. Снижение температуры в конце такта сжатия (T_c) позволяет успешно использовать газовое топливо с низким метановым числом, однако этот же фактор может негативно влиять на экологические показатели.

Из-за снижения температур в цилиндре замедляются процессы окисления метана, особенно в зонах у стенок камеры сгорания и в зазорах, где пламя затухает быстрее. Это объясняет рост проскока метана (methane slip), который часто наблюдается при использовании глубокого Миллера (особенно стратегии LIVC). Тем не менее, этот эффект можно компенсировать за счет более качественного перемешивания топливовоздушной смеси и усиления турбулентности в цилиндре. Для судовых двигателей основной задачей остается поиск баланса, при котором детонация исключена, но температура достаточна для полного выгорания газа.

Особенности применения данных на крупных двигателях

Стоит отметить, что большинство доступных исследований проводилось на двигателях малого размера. Для судовых энергетических установок большой мощности характерны иные масштабы процессов и большие объемы камер сгорания. Поэтому при внедрении цикла Миллера на реальных судах нужно учитывать инерционность турбокомпрессоров и необходимость поддерживать стабильную работу двигателя не только на полном ходу, но и на маневрах. В этой связи показательно численное исследование Ватолина [1], в котором на примере двигателя MAN 8L51/60DF было продемонстрировано, что глубокий цикл Миллера позволяет эффективно управлять детонацией и температурой газов на номинальных режимах, что особенно важно для крупных судовых установок.

Сравнение областей эффективности. Наиболее чёткое различие между LIVC и EIVC проявляется при смене режима нагрузки. Согласно данным [20], LIVC демонстрирует значительное преимущество на номинальных и высоких нагрузках: благодаря сохранению высокой степени расширения и турбулентности заряда повышение индикаторного КПД может достигать 20%. Однако это преимущество реализуется только при условии достаточного давления наддува, компенсирующего падение объёмной эффективности [19]. При недостаточном наддуве, что характерно для малых оборотов, эффективность LIVC резко снижается [20]. Напротив, EIVC оказывается предпочтительным на частичных нагрузках и режимах малого хода: раннее закрытие впускных клапанов существенно снижает насосные потери, что, по данным [3], даёт прирост

индикаторного КПД до 10%. Этот вывод подтверждается численными исследованиями Милова [23], который показал, что применение цикла Миллера (в его работе — EIVC) на газовом двигателе, конвертированном из дизеля, обеспечивает более высокую энергоэффективность на частичных нагрузках по сравнению с классическим циклом Отто. При этом EIVC не требует столь агрессивного наддува, но уступает LIVC в детонационной стойкости и интенсивности турбулентности [20, 32].

Эта закономерность имеет прямое практическое значение для судовых энергетических установок. Для судов, работающих преимущественно в крейсерском режиме с постоянной высокой нагрузкой (например, контейнеровозы, танкеры), LIVC является более рациональным выбором. Для судов с переменным режимом работы (паромы, буксиры, круизные суда, часто маневрирующие в портах) EIVC может обеспечить лучшую топливную экономичность на переходных и частичных режимах.

Детонационная стойкость и метановое число. Обе стратегии снижают температуру в конце сжатия и тем самым повышают детонационный порог, однако LIVC, как показано в [20, 35], демонстрирует более выраженный эффект. Это особенно важно для судов, вынужденных использовать газ с низким метановым числом (например, СУГ с МЧ 30–60 или водородосодержащие смеси). LIVC позволяет эффективно подавлять детонацию даже при значительном снижении МЧ, сохраняя приемлемый КПД [15, 25]. EIVC в этом отношении менее эффективен, но его применение на частичных нагрузках, где риск детонации ниже, является оправданным.

Эмиссионные показатели: NOx и methane slip. Обе стратегии способствуют снижению выбросов оксидов азота. Обобщение данных из [15, 20, 25] позволяет оценить снижение NOx для LIVC в диапазоне 15–25%, а для EIVC — 10–15%, что объясняется уменьшением пиковой температуры в цилиндре. Однако проблема проскока метана (methane slip) остаётся дискуссионной. Анализ литературы выявил два противоположных вектора. С одной стороны, [16] на примере двигателя с наддувом показали, что чрезмерное опережение фазы впуска (что является частью стратегии LIVC) может приводить к росту проскока метана и, как следствие, к падению крутящего момента. С другой стороны, [26] на тяжелом дизеле, переведённом на двухтопливный режим, продемонстрировали, что комбинация LIVC с RCCI-сгоранием позволяет снизить эмиссию метана до 80% по сравнению с обычным двухтопливным режимом.

Это противоречие не является случайным. Оно отражает тот факт, что влияние LIVC на полноту сгорания метана нелинейно и зависит от множества факторов: давления впрыска, конструкции камеры сгорания, наличия водорода в топливе, точной калибровки фаз газораспределения. Снижение температуры (ключевой механизм подавления детонации) может ухудшать условия для догорания метана в пристеночных зонах и зазорах, что ведёт к росту methane slip. Однако если одновременно с LIVC применяются меры по интенсификации смесеобразования и турбулентности (как в RCCI), положительный эффект может перевесить. Для судовых двигателей этот вопрос остаётся открытым и требует специальных экспериментальных исследований.

Требования к системе наддува и конструктивная сложность. LIVC предъявляет более высокие требования к системе наддува, что подтверждается работами [19, 20]. Для компенсации падения объёмной эффективности при LIVC часто требуется двухступенчатый наддув или комбинированные системы (использование турбокомпрессора и нагнетателя) [4, 10, 11]. Это увеличивает стоимость, массу и сложность установки, но может быть оправдано на мощных судовых двигателях. EIVC менее требователен к наддуву, однако для его эффективной реализации необходимы системы с точным управлением фазами (например, электрогидравлические или электромагнитные приводы клапанов), что также связано с дополнительными затратами.

Взаимодействие цикла Миллера с EGR и двухступенчатым наддувом

Цикл Миллера и рециркуляция отработавших газов (EGR) являются мощным тандемом для снижения NOx. Однако важно отметить, что они работают по-разному: Миллер снижает пиковую температуру сгорания за счёт изменения фаз, а EGR – за счёт разбавления заряда инертными газами. Исследования показывают, что комбинация цикла Миллера и системы EGR – один из наиболее многообещающих путей достижения жёстких норм IMO Tier III для судовых двигателей. Например, использование 25% EGR в паре с умеренным циклом Миллера (задержка закрытия выпускного клапана на 5° ПКВ) позволяет снизить выбросы NOx на 77% при минимальном росте расхода топлива (всего на 1,58%) [5]. В другом исследовании сочетание Миллера с EGR на четырёхтактном судовом двигателе продемонстрировало снижение NOx до 90% [28]. Однако у такого сочетания есть нюанс: применение EGR совместно с циклом Миллера может ухудшить переходные характеристики двигателя, что критично для судовых условий, поэтому при проектировании необходимо искать компромисс между экологией и динамикой [5].

Для сохранения мощности и эффективности при глубоком цикле Миллера необходима высокая степень повышения давления наддува. Двухступенчатые турбокомпрессоры с промежуточным охлаждением воздуха идеально подходят для этой задачи. Они не только компенсируют потерю плотности заряда, но и обеспечивают дополнительное снижение температуры, что усиливает антидетонационный эффект и позволяет сократить выбросы NOx более чем на 25% с минимальным влиянием на расход топлива [4, 10]. Синергия двухступенчатого наддува и цикла Миллера позволяет также расширить диапазон эффективной работы двигателя по нагрузке и частоте вращения [11].

Пробелы и направления дальнейших исследований. Анализ литературы выявил несколько существенных пробелов. Во-первых, большинство количественных данных по КПД и удельному расходу получено на автомобильных двигателях, а не на судовых с большим объемом

цилиндров. Перенос этих результатов требует осторожности, хотя общие термодинамические закономерности, как показывают работы [8, 12, 30], сохраняются. Во-вторых, данные по methane slip для судовых двигателей немногочисленны и противоречивы. Необходимы систематические экспериментальные исследования на полноразмерных судовых двигателях с измерением проскока метана при различных фазах газораспределения, нагрузках и составах газа. В-третьих, отсутствуют работы по адаптивному управлению фазами газораспределения в реальном времени в зависимости от текущего метанового числа топлива. Разработка таких систем (включая быстрые датчики состава газа и алгоритмы оптимизации фаз) является перспективным направлением, которое может значительно повысить топливную гибкость судовых газовых двигателей. Практические шаги в этом направлении уже предпринимаются. Так, в работе Jia et al. [14] на примере двигателя с высокой степенью сжатия показано, что асинхронное изменение фаз впускных клапанов (стратегия AVIVPMC) позволяет снизить удельный расход топлива более чем на 5% на большинстве режимов и одновременно повысить детонационную стойкость за счёт управляемого снижения эффективной степени сжатия. Это подтверждает потенциал интеллектуального управления фазами как ключевого элемента двигателя будущего. В свою очередь, Козлов, Фёдоров и Милов [17] на примере двигателя 6ЧН13/15 с циклом Миллера продемонстрировали, что уже на этапе целенаправленной калибровки фаз газораспределения и системы воздухоснабжения можно существенно повысить энергоэффективность газового двигателя. Эти исследования служат фундаментом для перехода к следующему этапу — разработке динамических систем адаптивного управления в реальном времени.

Таким образом, проведённый анализ подтверждает, что цикл Миллера является эффективным инструментом адаптации к переменному составу газового топлива, но выбор между LIVC и EIVC должен быть жёстко привязан к режиму работы двигателя и условиям эксплуатации. Дальнейшие исследования должны быть направлены на количественную оценку влияния метанового числа на оптимальные фазы газораспределения и на разработку систем адаптивного управления.

Заключение

Проведенный анализ литературы, посвященный сравнению стратегий позднего (LIVC) и раннего (EIVC) закрытия впускных клапанов в судовых газовых двигателях, позволяет сделать следующие выводы:

1. **Различия в применении стратегий.** LIVC и EIVC являются эффективными способами адаптации двигателя к газу с разным составом (метановым числом). Стратегия LIVC лучше проявляет себя на номинальных режимах нагрузки, обеспечивая высокую детонационную стойкость и рост КПД (до 20% по данным [20]), однако она требует установки мощных систем наддува. Стратегия EIVC более эффективна на частичных нагрузках за счет снижения насосных потерь, но при этом она меньше влияет на подавление детонации.
2. **Экологические показатели и «метановый парадокс».** Обе стратегии позволяют снизить выбросы оксидов азота (NOx) благодаря уменьшению температуры сгорания. В то же время вопрос проскока метана (methane slip) остается сложным. С одной стороны, глубокий цикл Миллера может привести к росту выбросов несгоревшего метана из-за слишком низких температур в цилиндре [16]. С другой стороны, применение современных методов сгорания (например, RCCI) позволяет снизить эти выбросы [26]. Это указывает на то, что для решения проблемы проскока метана требуется очень точная настройка фаз и конструкции камеры сгорания.
3. **Рекомендации по эксплуатации.** Выбор конкретной стратегии должен зависеть от назначения судна. Для крупнотоннажного флота (контейнеровозы, танкеры), работающего в основном на постоянных высоких нагрузках, более рационально применение LIVC. Для судов с частыми маневрами и переменными режимами (паромы, буксиры) предпочтительнее выглядит EIVC.
4. **Перспективы исследований.** На данный момент большинство данных получено на малоразмерных двигателях, что требует осторожности при их переносе на крупные судовые установки. Основными направлениями дальнейших работ должны стать:
   - Проведение испытаний на полноразмерных судовых двигателях для уточнения влияния метанового числа на оптимальные фазы газораспределения.
   - Изучение влияния цикла Миллера на проскок метана при различных нагрузках.
   - Разработка систем адаптивного управления, которые смогут в реальном времени подстраивать моменты закрытия клапанов под текущее качество газа с помощью специальных датчиков.

Предварительные исследования [14, 17] уже показывают потенциал оптимизации фаз для повышения эффективности, что подтверждает обоснованность выбранного вектора**.** В целом, реализация цикла Миллера является одним из наиболее перспективных методов повышения «топливной гибкости» судовых двигателей. Однако для достижения максимальной эффективности необходимо учитывать профиль работы судна и продолжать исследования в области минимизации выбросов несгоревшего метана.

Литература

1. Ватолин Д.С. Моделирование рабочего процесса, организованного по глубокому циклу Миллера в судовом двухтопливном дизеле // Научные проблемы водного транспорта. 2021. № 66. С. 85–98.
2. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping et al. Features of the development of environmentally safe modern diesel power plants. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2017, 9(3), 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.
3. Balmelli M., Zsiga N., Merotto L., Soltic P. Effect of the Intake Valve Lift and Closing Angle on Part Load Efficiency of a Spark Ignition Engine. *Energies*, 2020, 13(7), 1682. DOI: 10.3390/en13071682.
4. Cui Y., Hu Z., Deng K., Wang Q. Miller Cycle-Regulatable Two Stage Turbocharging System Design of Marine Diesel Engines. *ASME Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, ICEF2012-92036, 2012. DOI: 10.1115/ICEF2012-92036.
5. Duan X. et al. The effect of variable enhanced Miller cycle combined with EGR strategy on the cycle-by-cycle variations and performance of high compression ratio engines based on asynchronous valve opening strategy. *Energy*, 2025, 320, 135307. (доступен онлайн)
6. Ebrahimi R. A new design method for maximizing the work output of cycles in reciprocating internal combustion engines. *Energy Conversion and Management*, 2018, 172, 164–172. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.06.105.
7. Fomin V.M., Gusarov V.V., Latyshev A.P. Method of improving the characteristics of a gas engine, developed on the base of a diesel engine. *Traktory i selhozmashiny*, 2017, 84(1), 54–60. DOI: 10.31992/0321-4443-2017-1-54-60.
8. Gan H. et al. Investigation of the Miller cycle on the performance and emission in a natural gas-diesel dual-fuel marine engine by using two zone combustion model. *Thermal Science*, 2020, 24(1 Part A), 259–270. DOI: 10.2298/TSCI190426273G.
9. Han S.B., Chang Y.H., Choi G.H., Chung Y.J., Poompipatpong C., Koetniyom S. Effects of the Intake Valve Timing and the Injection Timing for a Miller Cycle Engine. *Journal of Energy Engineering*, 2010, 19(1).
10. He Y., Liu J., Zhu B., Sun D. Research on and development of a Miller cycle engine with multi-stage boosting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2016, 230(11), 1546–1557. DOI: 10.1177/0954407015617568.
11. He Y., Sun D., Liu J., Zhu B. Optimization of a turbocharger and supercharger compound boosting system for a Miller cycle engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2018, 232(2), 238–253. DOI: 10.1177/0954407017695136.
12. Imperato M., Kaario O., Sarjovaara T., Larmi M. Split fuel injection and Miller cycle in a large-bore engine. *Applied Energy*, 2016, 162, 289–297. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.095.
13. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2393 pp. DOI: 10.1017/9781009157896.
14. Jia D. et al. Experiment and simulation analysis of the effects of different asynchronous variable intake valve phase differences on the in-cylinder flow, combustion and performance characteristics of high compression ratio turbocharged enhanced Miller cycle engine. *Fuel*, 2025, 320, 134988.
15. Kesgin U. Efficiency improvement and NOx emission reduction potentials of two-stage turbocharged Miller cycle for stationary natural gas engines. *International Journal of Energy Research*, 2005, 29(3), 189–216. DOI: 10.1002/er.1048.
16. Kim S., Park C., Jang H., Kim C., Kim Y. Effect of boosting on a performance and emissions in a port fuel injection natural gas engine with variable intake and exhaust valve timing. *Energy Reports*, 2021, 7, 4941–4950. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.07.121.
17. Kozlov A.V., Fedorov V.A., Milov K.V. Improving the energy efficiency of a 6ChN13/15 gas engine with a Miller cycle by optimizing the valve timing. *Trudy NAMI*, 2022, (4), 41–52. DOI: 10.51187/0135-3152-2021-4-41-52.
18. Li T., Gao Y., Wang J., Chen Z. The Miller cycle effects on improvement of fuel economy in a highly boosted, high compression ratio, direct-injection gasoline engine: EIVC vs. LIVC. *Energy Conversion and Management*, 2014, 79, 59–65. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.12.022.
19. Li T., Wang B., Zheng B. A comparison between Miller and five-stroke cycles for enabling deeply downsized, highly boosted, spark-ignition engines with ultra expansion. *Energy Conversion and Management*, 2016, 123, 140–152. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.06.029.
20. Luisi S., Doria V., Stroppiana A., Millo F., Mirzaeian M. Experimental Investigation on Early and Late Intake Valve Closures for Knock Mitigation through Miller Cycle in a Downsized Turbocharged Engine. *SAE Technical Paper* 2015-01-0760, 2015. DOI: 10.4271/2015-01-0760.
21. Market Research Future. LNG Marine Engine Market Research Report: By Engine Type, Application, Power Output, Fuel Supply System and Regional – Forecast to 2035. Market Research Future, 2025.
22. Miller R. Supercharged engine. *Patent US2817322*, 1957.
23. Milov K.V. Computational studies of the influence of variable valve timing on the performance of a gas engine with Miller's thermodynamic cycle. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2061(1), 012066. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012066.
24. Oh J., Noh K., Lee C. A Theoretical Study on the Thermodynamic Cycle of Concept Engine with Miller Cycle. *Processes*, 2021, 9(6), 1051. DOI: 10.3390/pr9061051.

25. Okamoto K., Zhang F., Shimogata S., Shoji F. Development of a Late Intake-Valve Closing (LIVC) Miller Cycle for Stationary Natural Gas Engines - Effect of EGR Utilization. *SAE Technical Paper* 972948, 1997. DOI: 10.4271/972948.
26. Pedrozo V.B., Wang X., Guan W., Zhao H. The effects of natural gas composition on conventional dual-fuel and reactivity-controlled compression ignition combustion in a heavy-duty diesel engine. *International Journal of Engine Research*, 2022, 23(3), 397–415. DOI: 10.1177/1468087420984044.
27. Ribeiro B., Martins J. Direct Comparison of an Engine Working under Otto, Miller and Diesel Cycles: Thermodynamic Analysis and Real Engine Performance. *SAE Technical Paper* 2007-01-0261, 2007. DOI: 10.4271/2007-01-0261.
28. Schutting E., Dumböck O., Kraxner T., Eichlseder H. Thermodynamic consideration of the Miller cycle on the basis of simulation and measurements. In: *Internationaler Motorenkongress 2016 Proceedings*, Springer, 2016, 259–280. DOI: 10.1007/978-3-658-12918-7_18.
29. Szwaja S. Knock Reduction Measures in the Gas Fuelled Internal Combustion Engine. *Science and Technique*, 2020, 19(4), 339–348. DOI: 10.21122/2227-1031-2020-19-4-339-348.
30. Weber S., Stegmann R., Prager M., Wachtmeister G. The Effect of Inlet Valve Timing and Engine Speed on Dual Fuel NG-Diesel Combustion in a Large Bore Engine. *SAE International Journal of Engines*, 2018, 11(2), 229–246. DOI: 10.4271/03-11-02-0015.
31. Xin M. et al. Numerical simulation of methane slip from marine dual-fuel engine based on hydrogen-blended natural gas strategy. *Fuel*, 2024, 358, 130132. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.130132.
32. Xu J., Guo T., Feng Y., Sun M. Numerical investigation of Miller cycle with EIVC and LIVC on a high compression ratio gasoline engine. *Science Progress*, 2021, 104(2), 1–17. DOI: 10.1177/00368504211023640.
33. Xydas N. Liquid Gas, including LPG - The Alternative Marine Fuel Towards 2050. *World Liquid Gas Association (WLGA)*. URL: https://www.worldliquidgas.org/news/liquid-gas-including-lpg-the-alternative-marine-fuel-towards-2050/ (дата обращения: 02.03.2026).
34. Zhivljuk G.E., Petrov A.P. Environmental safety of power plants: dual-fuel and gas engines. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2022, 14(3), 449–462. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-449-462.
35. Zhou L., Song Y., Hua J., Liu F., Wei H. Effects of miller cycle strategies on combustion characteristics and knock resistance in a spark assisted compression ignition (SACI) engine. *Energy*, 2020, 206, 118119. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118119.

References

1. Vatolin D.S. Simulation of the working process organized according to the deep Miller cycle in a marine dual-fuel diesel engine // Nauchnye problemy vodnogo transporta. 2021. No. 66. P. 85–98.
2. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping et al. Features of the development of environmentally safe modern diesel power plants // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2017. Vol. 9, No. 3. P. 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.
3. Balmelli M., Zsiga N., Merotto L., Soltic P. Effect of the Intake Valve Lift and Closing Angle on Part Load Efficiency of a Spark Ignition Engine // Energies. 2020. Vol. 13, No. 7. P. 1682. DOI: 10.3390/en13071682.
4. Cui Y., Hu Z., Deng K., Wang Q. Miller Cycle-Regulatable Two Stage Turbocharging System Design of Marine Diesel Engines // ASME Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, ICEF2012-92036. 2012. DOI: 10.1115/ICEF2012-92036.
5. Duan X. et al. The effect of variable enhanced Miller cycle combined with EGR strategy on the cycle-by-cycle variations and performance of high compression ratio engines based on asynchronous valve opening strategy // Energy. 2025. Vol. 320. P. 135307. (available online)
6. Ebrahimi R. A new design method for maximizing the work output of cycles in reciprocating internal combustion engines // Energy Conversion and Management. 2018. Vol. 172. P. 164–172. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.06.105.
7. Fomin V.M., Gusarov V.V., Latyshev A.P. Method of improving the characteristics of a gas engine, developed on the base of a diesel engine // Traktory i selkhozmashiny. 2017. Vol. 84, No. 1. P. 54–60. DOI: 10.31992/0321-4443-2017-1-54-60.
8. Gan H. et al. Investigation of the Miller cycle on the performance and emission in a natural gas-diesel dual-fuel marine engine by using two zone combustion model // Thermal Science. 2020. Vol. 24, No. 1A. P. 259–270. DOI: 10.2298/TSCI190426273G.
9. Han S.B., Chang Y.H., Choi G.H., Chung Y.J., Poompipatpong C., Koetniyom S. Effects of the Intake Valve Timing and the Injection Timing for a Miller Cycle Engine // Journal of Energy Engineering. 2010. Vol. 19, No. 1.
10. He Y., Liu J., Zhu B., Sun D. Research on and development of a Miller cycle engine with multi-stage boosting // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2016. Vol. 230, No. 11. P. 1546–1557. DOI: 10.1177/0954407015617568.
11. He Y., Sun D., Liu J., Zhu B. Optimization of a turbocharger and supercharger compound boosting system for a Miller cycle engine // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2018. Vol. 232, No. 2. P. 238–253. DOI: 10.1177/0954407017695136.
12. Imperato M., Kaario O., Sarjovaara T., Larmi M. Split fuel injection and Miller cycle in a large-bore engine // Applied Energy. 2016. Vol. 162. P. 289–297. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.095.

13. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2393 pp. DOI: 10.1017/9781009157896.
14. Jia D. et al. Experiment and simulation analysis of the effects of different asynchronous variable intake valve phase differences on the in-cylinder flow, combustion and performance characteristics of high compression ratio turbocharged enhanced Miller cycle engine // Fuel. 2025. Vol. 320. P. 134988.
15. Kesgin U. Efficiency improvement and NOx emission reduction potentials of two-stage turbocharged Miller cycle for stationary natural gas engines // International Journal of Energy Research. 2005. Vol. 29, No. 3. P. 189–216. DOI: 10.1002/er.1048.
16. Kim S., Park C., Jang H., Kim C., Kim Y. Effect of boosting on a performance and emissions in a port fuel injection natural gas engine with variable intake and exhaust valve timing // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 4941–4950. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.07.121.
17. Kozlov A.V., Fedorov V.A., Milov K.V. Improving the energy efficiency of a 6ChN13/15 gas engine with a Miller cycle by optimizing the valve timing // Trudy NAMI. 2022. No. 4. P. 41–52. DOI: 10.51187/0135-3152-2021-4-41-52.
18. Li T., Gao Y., Wang J., Chen Z. The Miller cycle effects on improvement of fuel economy in a highly boosted, high compression ratio, direct-injection gasoline engine: EIVC vs. LIVC // Energy Conversion and Management. 2014. Vol. 79. P. 59–65. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.12.022.
19. Li T., Wang B., Zheng B. A comparison between Miller and five-stroke cycles for enabling deeply downsized, highly boosted, spark-ignition engines with ultra expansion // Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 123. P. 140–152. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.06.029.
20. Luisi S., Doria V., Stroppiana A., Millo F., Mirzaeian M. Experimental Investigation on Early and Late Intake Valve Closures for Knock Mitigation through Miller Cycle in a Downsized Turbocharged Engine // SAE Technical Paper 2015-01-0760. 2015. DOI: 10.4271/2015-01-0760.
21. Market Research Future. LNG Marine Engine Market Research Report: By Engine Type, Application, Power Output, Fuel Supply System and Regional – Forecast to 2035. Market Research Future, 2025.
22. Miller R. Supercharged engine. Patent US2817322, 1957.
23. Milov K.V. Computational studies of the influence of variable valve timing on the performance of a gas engine with Miller's thermodynamic cycle // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2061, No. 1. P. 012066. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012066.
24. Oh J., Noh K., Lee C. A Theoretical Study on the Thermodynamic Cycle of Concept Engine with Miller Cycle // Processes. 2021. Vol. 9, No. 6. P. 1051. DOI: 10.3390/pr9061051.
25. Okamoto K., Zhang F., Shimogata S., Shoji F. Development of a Late Intake-Valve Closing (LIVC) Miller Cycle for Stationary Natural Gas Engines - Effect of EGR Utilization // SAE Technical Paper 972948. 1997. DOI: 10.4271/972948.
26. Pedrozo V.B., Wang X., Guan W., Zhao H. The effects of natural gas composition on conventional dual-fuel and reactivity-controlled compression ignition combustion in a heavy-duty diesel engine // International Journal of Engine Research. 2022. Vol. 23, No. 3. P. 397–415. DOI: 10.1177/1468087420984044.
27. Ribeiro B., Martins J. Direct Comparison of an Engine Working under Otto, Miller and Diesel Cycles: Thermodynamic Analysis and Real Engine Performance // SAE Technical Paper 2007-01-0261. 2007. DOI: 10.4271/2007-01-0261.
28. Schutting E., Dumböck O., Kraxner T., Eichlseder H. Thermodynamic consideration of the Miller cycle on the basis of simulation and measurements // In: Internationaler Motorenkongress 2016 Proceedings. Wiesbaden: Springer, 2016. P. 259–280. DOI: 10.1007/978-3-658-12918-7_18.
29. Szwaja S. Knock Reduction Measures in the Gas Fuelled Internal Combustion Engine // Science and Technique. 2020. Vol. 19, No. 4. P. 339–348. DOI: 10.21122/2227-1031-2020-19-4-339-348.
30. Weber S., Stegmann R., Prager M., Wachtmeister G. The Effect of Inlet Valve Timing and Engine Speed on Dual Fuel NG-Diesel Combustion in a Large Bore Engine // SAE International Journal of Engines. 2018. Vol. 11, No. 2. P. 229–246. DOI: 10.4271/03-11-02-0015.
31. Xin M. et al. Numerical simulation of methane slip from marine dual-fuel engine based on hydrogen-blended natural gas strategy // Fuel. 2024. Vol. 358. P. 130132. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.130132.
32. Xu J., Guo T., Feng Y., Sun M. Numerical investigation of Miller cycle with EIVC and LIVC on a high compression ratio gasoline engine // Science Progress. 2021. Vol. 104, No. 2. P. 1–17. DOI: 10.1177/00368504211023640.
33. Xydas N. Liquid Gas, including LPG - The Alternative Marine Fuel Towards 2050. World Liquid Gas Association (WLGA). URL: https://www.worldliquidgas.org/news/liquid-gas-including-lpg-the-alternative-marine-fuel-towards-2050/ (accessed: 02.03.2026).
34. Zhivljuk G.E., Petrov A.P. Environmental safety of power plants: dual-fuel and gas engines // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2022. Vol. 14, No. 3. P. 449–462. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-449-462.
35. Zhou L., Song Y., Hua J., Liu F., Wei H. Effects of miller cycle strategies on combustion characteristics and knock resistance in a spark assisted compression ignition (SACI) engine // Energy. 2020. Vol. 206. P. 118119. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118119.

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

Антропова Маргарита Вячеславовна, аспирант кафедры эксплуатации судовых энергетических установок, ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 603000, г Нижний Новгород, ул Нестерова, д. 5, помощник главного конструктора по ДВС, АО «РУМО», 603061, г. Нижний Новгород, ул. Адмирала Нахимова, 13 e-mail: m.loginova@aorumo.ru

Margarita V. Antropova, Graduate Student, Department of Marine Power Plants Operation, Volga State University of Water Transport (VSUWT), 5 Nesterova St., Nizhny Novgorod, 603000, Russian Federation; Assistant to Chief Designer for Internal Combustion Engines, JSC «RUMO», 13 Admirala Nakhimova St., Nizhny Novgorod, 603061, Russian Federation. e-mail: m.loginova@aorumo.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 07.07.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 14.07.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 15.07.2026.

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS

Научная статья
УДК 532.3:532.5:629.585
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.029

Движение погруженного тела под ледяным покровом, ослабленным поперечной трещиной

Земляк В.Л.[1] vellkom@list.ru, **Козин В.М.**[2] kozinvictor@rambler.ru
[1]Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, [2]Институт машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН

Аннотация. В работе с помощью модельных экспериментов, проведенных на базе опытового ледового бассейна, исследован процесс движения моделей подводных аппаратов вблизи нижней поверхности ледяного покрова ослабленного поперечной раскрытой трещиной. В качестве моделей выбрано тело вращения с цилиндрической вставкой и размещенными на корпусе выступающими частями, в виде рубки крыловидной формы и кормового оперения. Модель льда пресноводная, без добавок и примесей, намораживалась естественным холодом до заданной толщины. Повышенная прочность ледяного покрова компенсировалась меньшей толщиной намораживаемого льда. Для перемещения моделей использовалась тросовая буксировочная система, которая позволяла определять изменение заглубления модели под воздействием подъемной силы при заданной скорости движения и определять угол дифферента от гидродинамического момента. С помощью лазерного датчика вертикальных перемещений определялся профиль взволнованной поверхности льда. Для оценки ледоразрушающей способности, генерируемых изгибно-гравитационных волн использовался геометрический критерий ледоразрушения. Рост площади смоченной поверхности за счет выступающих частей, как и наличие свободной кромки, приводило к резкому возрастанию амплитуды колебаний ледяного покрова и увеличению эффективности разрушения льда. Возрастала и величина относительного вертикального перемещения, которая существенно зависела от относительной скорости движения моделей. При *Fr=0,33-0,45* модели притягивались к нижней поверхности ледяного покрова, далее подъемная сила меняла свой знак и заглубление начинало возрастать. При малых значениях числа *Fr* движение происходило с незначительным дифферентом на корму. Далее возникал дифферент на нос максимум, которого зависел от наличия выступающих частей и моделируемых ледовых условий.

Ключевые слова: погруженное тело, ледяной покров, изгибно-гравитационные волны, вертикальное перемещение, поперечная трещина
Финансирование: Исследование выполнено в рамках проекта FSNZ-2024-0010 (№ 1024060700009-7-2.3.2) на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания вузам
Для цитирования: Земляк В.Л., Козин В.М. Движение погруженного тела на малом заглублении в ледовых условиях, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 46—53. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.029

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.029

Movement of a submerged body under an ice cover weakened by a transverse crack

Vitaliy L. Zemlyak[1] vellkom@list.ru, **Viktor M. Kozin**[2] kozinvictor@rambler.ru
[1]Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan, Russian Federation, [2]Institute of Machine Science and Metallurgy of Khabarovsk FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation

Abstract. In this study, model experiments conducted in an experimental ice tank were used to investigate the motion of underwater vehicle models near the undersurface of an ice cover weakened by a transverse open crack. The models were a body of revolution with a cylindrical insert and protruding parts mounted on the hull, in the form of a wing-shaped conning tower and aft empennage. The ice model, made of freshwater ice without additives or impurities, was frozen by natural cold to a specified thickness. The increased strength of the ice cover was compensated for by a smaller thickness of the frozen ice. A cable towing system was used to move the models, allowing for the change in model depth to be determined under the influence of lift at a given speed and the trim angle to be determined from the trimming moment. A laser vertical displacement sensor was used to determine the profile of the rough ice surface. A geometric ice-breaking criterion was used to assess the ice-breaking capacity of the generated flexural-gravity waves. The increase in wetted surface area due to protruding parts, as well as the presence of a free edge, led to a sharp increase in the amplitude of ice sheet oscillations and increased ice breaking efficiency. The magnitude of the relative vertical displacement also increased, significantly dependent on the relative speed of the models. At *Fr* = 0.33-0.45, the models were attracted to the lower surface of the ice sheet; then, the lift force reversed, and the penetration began to increase.

© Земляк В.Л., Козин В.М. 2026

At low Fr values, movement occurred with a slight trim by the stern. Subsequently, a maximum trim by the bow occurred, the maximum of which depended on the presence of protruding parts and the simulated ice conditions.
Key words: submerged body, ice cover, flexural-gravity waves, vertical displacement, transverse crack
Financial Support: The study was performed under the project FSNZ-2024-0010 (No. 1024060700009-7-2.3.2) of the task for fulfillment of the government works in the field of science within the base part of the government task for higher education establishment
For citation: Vitaliy L. Zemlyak, Viktor M. Kozin, Movement of a submerged body under an ice cover weakened by a transverse crack, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 46—53. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.029

Введение

Высокие темпы освоения арктического региона и интенсивное развитие подводной инфраструктуры в районах с замерзающей акваторией требует постоянной необходимости в обслуживании и мониторинге добывающих платформ, подводных объектов, коммуникаций, кабелей связи, трубопроводов. Для решения постоянно расширяющегося круга инженерных задач могут быть успешно применены подводные аппараты (ПА) С развитием беспилотных систем требования к скорости перемещения и маневренности ПА на малой глубине погружения постоянно растут. Открытым остается вопрос и безопасности всплытия устройства в сложной ледовой обстановке. Всплытие путем статического пролома льда корпусом малоприменимо для ПА небольшого водоизмещения. В теоретической работе Хейсина [1] показано, что при воздействии нагрузки на ледяной покров будет генерироваться изгибная волна, которой в воде будет сопутствовать гравитационная волна, затухающая с глубиной. Такую комбинацию волн называют изгибно-гравитационной (ИГВ). Впервые экспериментально возможность разрушения льда ИГВ от движения погруженного тела была установлена в работе [2], показав высокую эффективность по сравнению с традиционным способом разрушения ледяного покрова. Очевидно, что на повышение ледоразрушающей способности ИГВ могут влиять как ледовые условия, в которых перемещается ПА, так и форма его корпуса [3]. В работе [4] представлен обзор теоретических и экспериментальных результатов изучения поведения плавающего ледяного покрова под действием внешних нагрузок, в том числе погруженных. Исследования колебаний плавающего ледяного покрова под действием движущихся возмущений переменной интенсивности выполнены в работе [5]. В исследовании [6] на основе дисперсионного соотношения для ИГВ рассмотрена их классификация в плавучем льду, предложен критерий разрушения морского льда, основанный на понятии предельной деформации. Работа [7] посвящена решению задачи об установившихся колебаниях горизонтального цилиндра, под ледяным покровом с бесконечной прямолинейной трещиной, параллельной оси цилиндра. Влияние продольных трещин и разводий различной ширины, на параметры генерируемых ИГВ от движения погруженного тела рассмотрены в работе [8].

Dawson в экспериментально-теоретическом исследовании [9] пришел к выводу, что при стационарном движении погруженного тела на малом заглублении наибольшее эксплуатационное значение приобретает вертикальная подъемная сила F_Z и гидродинамический момент M_Y. Причем величина вертикального перемещения тела h_m и угол дифферента γ, зависят от скорости движения и могут влиять на безопасность перемещения устройства подо льдом [3]. На сегодняшний день данные параметры могут быть определены только экспериментально.

Цель работы – с помощью модельных экспериментов исследовать процесс движения модели ПА на малом заглублении вблизи льда ослабленного поперечной раскрытой трещиной и выполнить оценку влияния моделируемых ледовых условий и выступающих частей, расположенных на корпусе модели на величину h_m, угол γ и параметры генерируемых в системе лед-вода ИГВ.

Подготовка к проведению модельного эксперимента

Моделирование движения погруженного тела вблизи нижней поверхности ледяного покрова ослабленного поперечной раскрытой трещиной осуществлялось на базе ледового бассейна научной лаборатории ледотехники (ФГБОУ ВО Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема) [10]. Размеры бассейна обеспечивали малое влияния стенок и дна чаши на параметры движения модели ПА и характер распространения ИГВ в соответствии с рекомендациями работы [11]. Глубина воды в чаше составила T_T=6,9D_m (где D_m – диаметр корпуса модели без учета высоты рубки и кормового оперения). Схема проведения экспериментов и габариты бассейна показаны на рис. 1. Подобные размеры характерны для мировой практики испытания моделей погруженных тел в опытовых бассейнах [12].

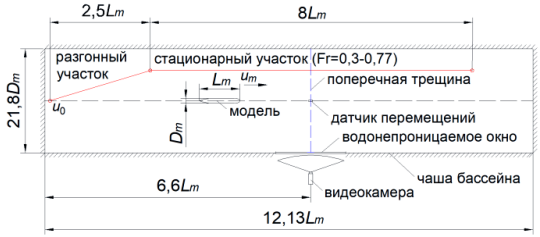


Рис. 1. Вид сверху на схему проведения модельных экспериментов

Модель ПА начинала движение с ускорением до заданной скорости u_m из состояния покоя. Далее происходило перемещение по стационарному участку длины, которого было достаточно для формирования волновой картины, записи ее лазерным бесконтактным датчиком вертикальных перемещений и фиксации процесса разрушения льда ИГВ высокоскоростной камерой. При движении, от воздействия силы F_Z, первоначально заданное заглубление модели h=1,45D_m изменялось на величину h_m, для определения которой использовалась камера, расположенная напротив водонепроницаемого окна, вмонтированного в

боковую стенку чаши бассейна. На основе полученных данных графическим методом также определялся и угол *γ* модели тела.

Для буксировок использовалось четыре модели ПА. Корпуса моделей имели одинаковую форму и относительное удлинение L_m/D_m=8,4 (где L_m – длина модели, равная 1,154 м). На модели №1 отсутствовали выступающие части, а корпус имел геометрию аналогичную модели Joubert BB2 [13]. На модели №2 в кормовой оконечности устанавливалось горизонтальное и вертикальное оперение. У модели №3 в носовой оконечности на расстоянии равном 0,22 L_m от носового перпендикуляра располагалась рубка крыловидной формы. На корпусе модели №4 было установлено как оперение, так и рубка (рис. 2)

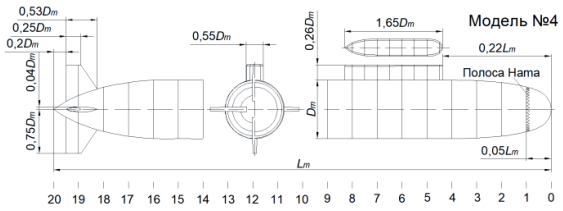


Рис. 2. Теоретический чертеж модели №4

Для моделирования турбулентного режима течения в виду небольших габаритов моделей ПА в качестве турбулизатора использовалась полоса Hama [14], расположенная на расстоянии 0,05L_m от носового перпендикуляра. Для буксировок использовалась тележка и тросовая система, натяжение которой обеспечивало перемещение моделей с нулевой плавучестью для заданного заглубления h=1,45D_m м по оси Z на расстояние равное 1,5D_m в обоих направлениях. Это обеспечивало возможность измерения в процессе буксировки величины вертикального перемещения h_m, которая менялась в зависимости от u_m под воздействием F_Z и угол дифферента *γ*.

Моделирование ледяного покрова осуществлялось в соответствии с рекомендациями работы Ногида [15]. Модель льда пресноводная, без добавок, повышенная прочность компенсировалась меньшей толщиной намораживаемого ледяного покрова и вычислялась по формуле [2]:

$$h_n=h_m\,\lambda_l^{4/3}([\sigma_u]_n/[\sigma_u]_m)^{-1/3} \quad (1)$$

где $[\sigma_u]_n$ – предел прочности натурного льда на изгиб; $[\sigma_u]_m$ – предел прочности модельного льда на изгиб.

Значения $[\sigma_u]_m$ определялись после каждой серии экспериментов [16] , при этом соотношение E/σ_u для натурального и модельного льда также выполнялось [17].

Оценка ледоразрушающей способности ИГВ генерируемых от движения моделей ПА производилась с помощью геометрического критерия ледоразрушения *α*, показывающего зависимость разрушения льда от угла наклона ледяной пластины. Ранее экспериментально было установлено, что при значениях α>0,04 в сплошном льду происходит не только появление трещин, но и их раскрытие [18]:

$$\alpha=2\pi w_m/\lambda_m \quad (2)$$

где w_m – прогиб модельного льда; λ_m – длина модельных ИГВ.

Параметры ИГВ пересчитывались согласно формуле:

$$\lambda_n/\lambda_m=w_n/w_m=\lambda_l \quad (4)$$

где λ_n – длина натурных ИГВ; w_n – прогиб натурного льда.

Модель тела была геометрически подобна натурному судну:

$$L_n/L_m=\lambda_l \quad (3)$$

где L_n – длина натуры.

Модельный лед намораживался с помощью естественного холода. Эксперименты проводились в ограниченный период года (декабрь-февраль), при температуре внутри помещения, где расположена чаша бассейна от -9^0 до -15^0 С. Для получения наиболее значимых результатов были выполнены предварительные серии буксировок, которые показали, что наибольший эффект можно наблюдать при относительном первоначально заданном заглублении h=1,45D_m, относительной скорости движения $Fr=u_m/(gL_m)^{1/2}$=0,3-0,77 (где g – ускорение свободного падения) и толщине модельного льда h_{im}=2 мм. Меньшее заглубление моделей не использовалось ввиду возможного контакта кормового среза рубки и хвостового оперения с чашей прогиба льда. А при большем заглублении начиналось влияние дна чаши бассейна на исследуемые параметры. Перпендикулярно движению модели на всю ширину ледового бассейна в поле модельного ледяного покрова пропиливалась поперечная трещина (см. рис. 1).

Результаты модельных экспериментов

При проведении экспериментов на первом этапе осуществлялись буксировки модели №1 не имеющей выступающих частей под сплошным льдом. Далее моделировалось движение моделей №1-4 под ледяным покровом, ослабленным поперечной трещиной. Полученные результаты сравнивались между собой. На рис. 3 приведены зависимости критерия ледоразрушения *α* от числа Fr.

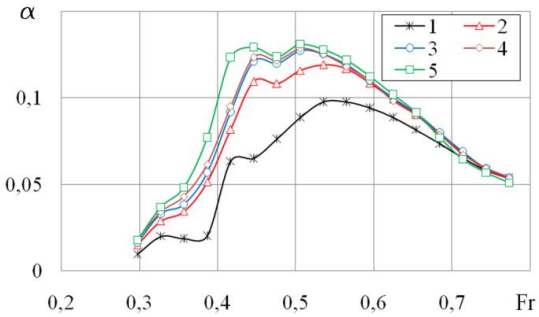
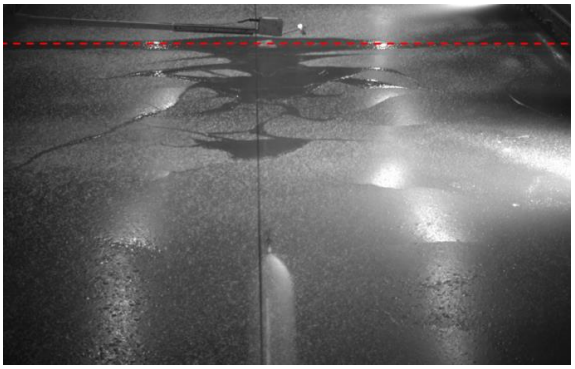


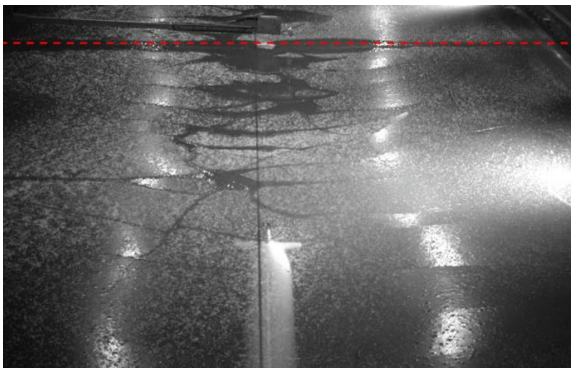
Рис. 3. Зависимости α от Fr: 1 - модель №1 (сплошной лед); 2 - модель №1 (поперечная трещина); 3 - модель №2 (поперечная трещина); 4 - модель №3 (поперечная трещина); 5 - модель №4 (поперечная трещина)

Из графиков видно, что наличие поперечной трещины повышало ледоразрушающую способность ИГВ, что связано с резким ростом амплитуды колебаний ледяного покрова, которая увеличивалась и при наличии выступающих частей (модели №2-4), за счет роста площади смоченной поверхности корпуса и полного сопротивления при движении модели. Эффективность разрушения льда моделью № 4 была наибольшей (рис. 4).

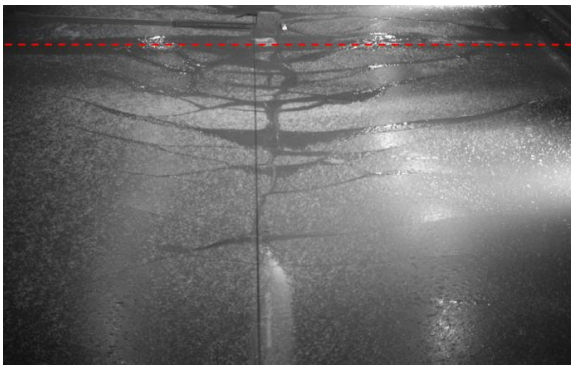
При малых значениях Fr=0,3-0,39 разрушение льда ИГВ от движения модели №1 как под сплошным льдом, так и подо льдом, ослабленным свободной кромкой не фиксировалось. Наличие выступающих частей приводило к росту кривизны ИГВ, значения параметра α для моделей №2-4 резко увеличивались, особенно при Fr>0,39 (рис. 3). При движении модели №4 появление и раскрытие поперечных трещин происходило при Fr=0,36. С ростом относительной скорости движения эффективность разрушения льда возрастала, достигая максимума при Fr=0,48 (рис. 5). При Fr=0,42 во всех моделируемых случаях во льду формировались поперечные трещины. Интенсивность разрушения льда начинала существенно увеличиваласъ с ростом площади смоченной поверхности моделей за счет выступающих частей.



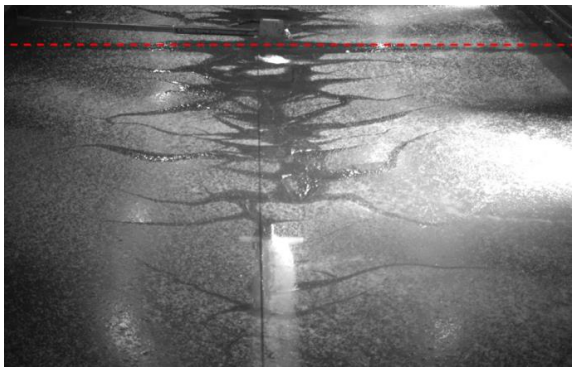
а)



б)

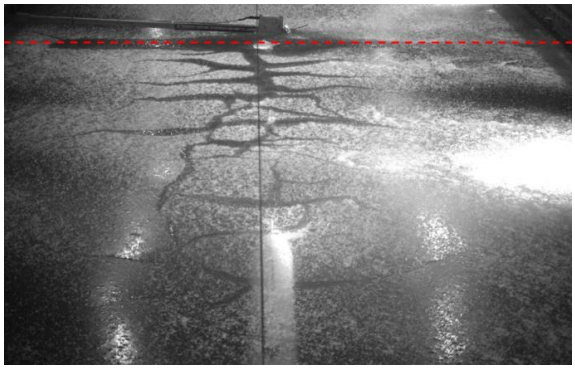


в)

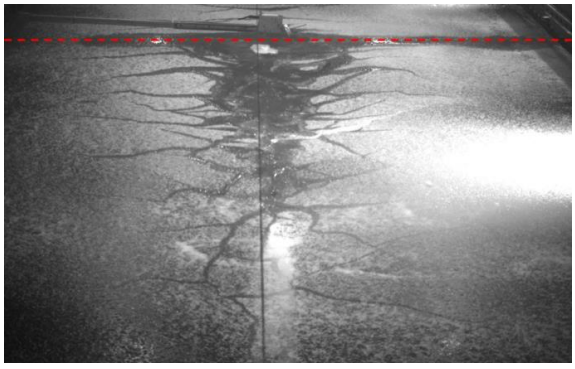


г)

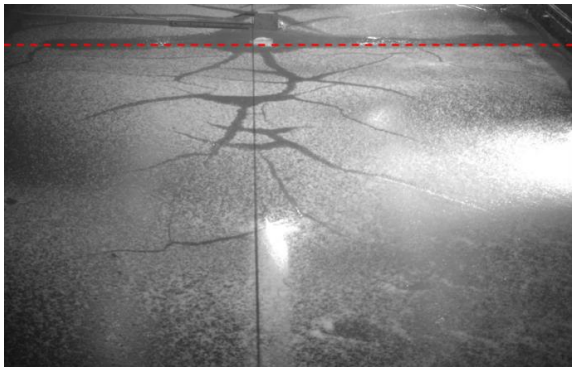
Рис. 4. Изменение характера разрушение модельного льда ИГВ от движения моделей при Fr=0,45 (красная линия – положение поперечной трещины)
а) модель №1; б) модель №3; в) модель №3; в) модель №4



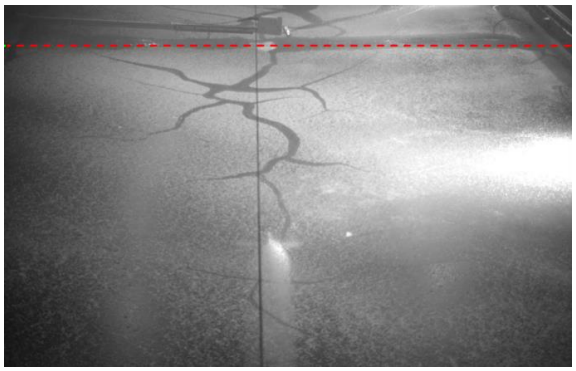
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Изменение характера разрушение модельного льда ИГВ от движения модели №4 (красная линия – положение поперечной трещины)
а) Fr=0,42; б) Fr=0,48; в) Fr=0,54; в) Fr=0,71

С увеличением относительной скорости движения площадь разрушаемого ледяного покрова возрастала, достигая максимума при Fr=0,51. Далее интенсивность снижалась, угол фронта волны поперечных трещин постепенно увеличивался. Несмотря на то, что с ростом Fr значения α превышали величину 0,05, раскрытие формирующихся трещин происходило слабо из-за малой кривизны ИГВ. Разрушение льда практически не фиксировалось (рис. 5).

С ростом величины Fr происходила трансформация ИГВ. На рис. 6 приведен пример изменения профиля взволнованной поверхности льда от движения модели №4. Профили показывают, что в диапазоне Fr=0,42-0,54 форма прогиба ИГВ менялась из-за интерференции носовой и волновой системы волн, в результате которой максимальная точка прогиба распадалась на два максимума. Величина максимального прогиба снижалась, а длина волны возрастала, эффективность разрушения льда падала, что особенно заметно при Fr=0,45-0,48 (рис. 3).

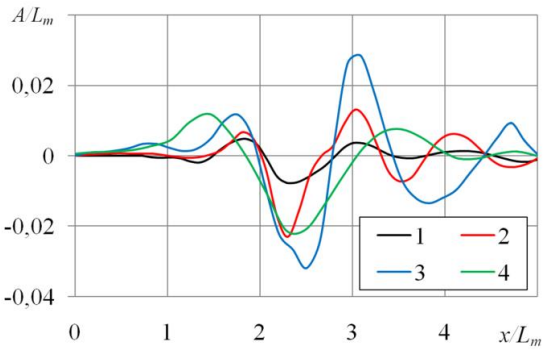


Рис. 6. Характер изменения профиля взволнованной поверхности ледяного покрова ослабленного поперечной трещиной от движения модели №4: 1 – Fr=0,36; 2 – Fr=0,42; 3 – Fr=0,51; 4 – Fr=0,71

Параметры движения моделей также зависели от значения Fr. При Fr>0,33 значения первоначально заданного заглубления h=1,45D_m начинало уменьшаться на h_m, достигая минимальной величины при Fr=0,45 (рис. 7).

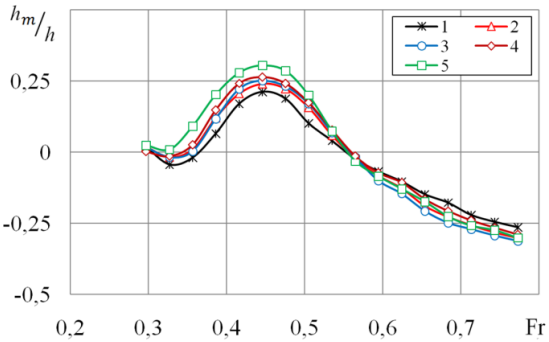


Рис. 7. Зависимости h_m/h от Fr

1 - модель №1 (сплошной лед); 2 - модель №1 (поперечная трещина); 3 - модель №2 (поперечная трещина); 4 - модель №3 (поперечная трещина); 5 - модель №4 (поперечная трещина)

Далее F_Z меняла свой знак. Заглубление из-за изменения формы профиля взволнованной поверхности и соответсвенно гидростатического давления над моделью ПА возрастало, становясь равным величине h при Fr=0,56.

Кривые угла дифферента γ также имели сложный характер с локальным максимумом при Fr>0,39 для всех рассмотренных случаев, когда модели испытывали дифферент на корму (рис. 8). Далее знак гидродинамического момента менялся и возникал дифферент на нос, который достигал своего максимума в широком диапазоне значений от Fr=0,48 (модель №4), до Fr=0,57 (модель №1 при движении под сплошным льдом).

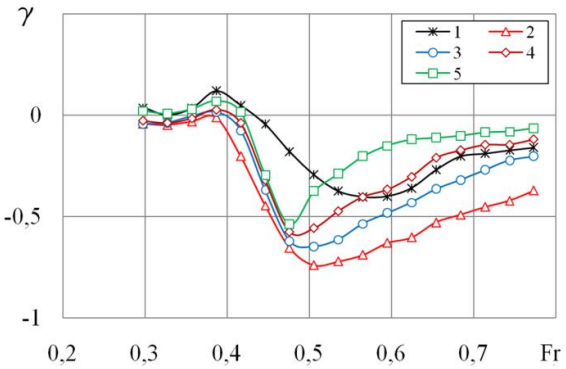


Рис. 8. Зависимости γ от Fr
1 - модель №1 (сплошной лед); 2 - модель №1 (поперечная трещина); 3 - модель №2 (поперечная трещина); 4 - модель №3 (поперечная трещина); 5 - модель №4 (поперечная трещина)

Эксперименты показали, что при минимальном значении относительной величины h_m/h, т.е при Fr=0,42-0,45 величина угла дифферента хоть и не достигала максимума, но была также достаточно существенной. В результате модели №2 и №4, практически касались кормовым оперением чаши прогиба льда. Также минимальный зазор между кормовым срезом рубки и нижней поверхностью ледяного покрова фиксировался при движении моделей №3 и №4 (рис. 9).

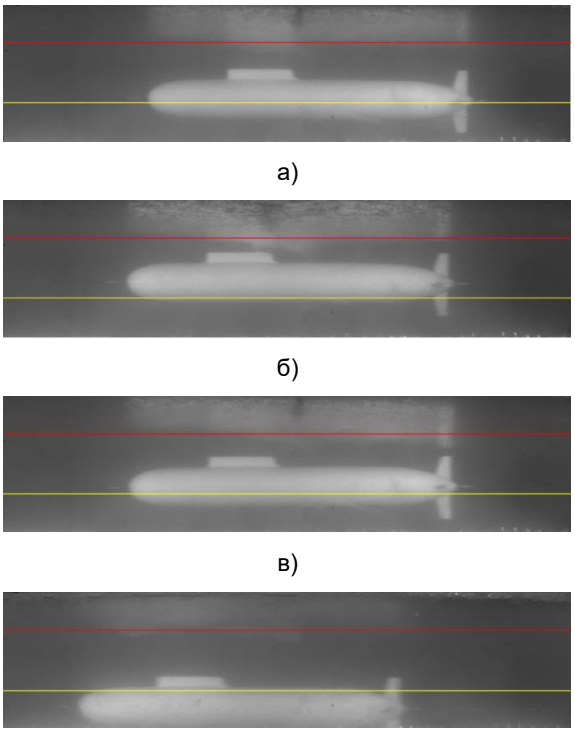


Рис. 8. Положение модели №4 при ее движении вблизи нижней поверхности льда ослабленного, поперечной трещиной (красная линия – нижняя поверхность льда; желтая линия – величина $h=1,45D_m$)
а) Fr=0,42; б) Fr=0,48; в) Fr=0,54; в) Fr=0,71

Очевидно, что для повышения безопасности движения ПА в ледовых условиях при небольшом заглублении, особенно при наличии на поверхности выступающих частей необходимо перемещение с относительной скоростью Fr>0,48, когда заглубление начинает существенно возрастать (рис. 7), а чаша прогиба льда смещается за кормовую оконечность тела (рис. 6).

Заключение

С помощью модельных экспериментов изучено влияния выступающих частей на характер движения модели ПА под ледяным покровом, ослабленным поперечной трещиной. Выполнена оценка влияния рассмотренных факторов на характер волнообразования и ледоразрушающую способность, генерируемых ИГВ.

Наличие свободной кромки приводило к резкому возрастанию амплитуды колебаний ледяного покрова и росту эффективности разрушения льда ИГВ. Ледоразрушающая способность ИГВ также зависела от роста площади смоченной поверхности моделей при размещении на корпусе рубки и кормового оперения, достигая максимума у модели №4, при этом минимальное значение, при котором фиксировалось образование трещин в ледяном покрове, составило Fr=0,36.

С ростом числа Fr происходила трансформация ИГВ за счет интерференции носовой и кормовой волновой системы, величина максимального прогиба падала, длина волны возрастала. В результате в диапазоне Fr=0,45-0,48 эффективность разрушения льда снижалась.

При Fr=0,45 величина заглубления моделей приобретала минимальное значение, т.е. модели ПА максимально притягивались к нижней поверхности льда. Расстояние между корпусом и чашей прогиба становилось минимальным. Далее с ростом относительной скорости подъемная сила меняла знак, заглубление начинало вновь возрастать.

При малых значениях числа Fr движение происходило с незначительным дифферентом на корму. При Fr>0,39 модели имели дифферент на нос максимум, которого зависел от наличия выступающих частей и моделируемых ледовых условий. Он фиксировался в широком диапазоне значений от Fr=0,48 для модели №4, до Fr=0,57 для модели №1 при ее движении под сплошным льдом.

Литература

1. Хейсин Д.Е. Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1967, 216 с.
2. Козин В.М., Онищук А.В., Модельные исследования волнообразования в сплошном ледяном покрове от движения подводного судна. Прикладная механика и техническая физика. 1994. № 2. С. 78-81.
3. Земляк В.Л., Козин В.М., Васильев А.С. Экспериментальное определение параметров движения погруженного тела и волнообразования в ледовых условиях. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3-3 (61). С. 77-87. https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.047
4. Стурова И.В., Ткачева Л.А. Поведение плавающего ледяного покрова под действием внешних нагрузок (обзор). Прикладная механика и техническая физика. 2025. № 3 (391). С. 3-55. http://dx.doi.org/10.15372/PMTF202415617
5. Маленко Ж.В., Ярошенко А.А. Изгибно-гравитационные волны в ледяном покрове от движущихся периодически изменяющихся возмущений. Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2024. № 3. С. 45-56. https://doi.org/10.31857/S1024708424030042
6. Korobkin A.A., Khabakhpasheva T.I. Consistent models of flexural-gravity waves in floating ice // Journal of Marine Science and Engineering. 2025. Vol. 13. No. 6. 1191. https://doi.org/10.3390/jmse13061191/
7. Стурова И.В. Влияние трещины в ледяном покрове на гидродинамические характеристики погруженного колеблющегося цилиндра. Прикладная математика и механика. 2015. Т. 79. № 2. С. 251-263.
8. Козин В.М., Чижиумов С.Д., Земляк В.Л. Исследование влияния ледовых условий на эффективность резонансного способа разрушения ледяного покрова, реализуемого подводными судами. Прикладная механика и техническая физика. 2010. Т. 51. № 3 (301). С. 118-125.
9. Dawson E. An investigation into the effects of submergence depth, speed and hull length-to-diameter ratio on the near-surface operation of conventional submarines: Thesis … Master of Philosophy / Dawson E.; University of Tasmania. Hobart, 2014. 214 p.

10. Земляк В.Л., Козин В.М. Ледовый бассейн лаборатории ледотехники. Вестник Приамурского гос. ун-та им. Шолом-Алейхема, 2021. № 1(42). С. 19–31. https://doi.org/10.24412/2227-1384-2021-142-19-31
11. Войткунский Я.И. Сопротивление движению судов. Л.: Судостроение, 1988, 288 с.
12. Mackay M.A. Review of Sting Support Interference and Some Related Issues fo the Marine Dynamic Test Facility (MDTF). St. John's, Newfoundland: Defence Research Establishment Atlantic, 1993. 59 p.
13. Anderson B., Chapuis M., Erm L., Fureby C., Giacobello M., Henbest S., Jones D., Jones M., Kumar C., Liefvendahl M., Manovski P., Norrison D., Quick H., Snowden A., Valiyff A., Widjaja R., Woodyatt B. Experimental and computational investigation of a generic conventional submarine hull form / In: 29th Symposium on naval hydrodynamics, Gothenburg, Sweden, 26–31 August 2012.
14. Hama F.R., Long J.D., Hegarty J.C. On Transition from Laminar to Turbulent Flow // Journal of Applied Physics. 1957. Vol. 28. P. 388–394. https://doi.org/10.1063/1.1722760.
15. Ногид Л.М. Моделирование движения судна в сплошном ледяном поле и в битых льдах. Труды ЛКИ. 1959. Вып. 28. С. 179–185.
16. Степанюк А.И. Технологии испытаний и моделирования морского льда. Санкт-Петербург Гидрометеоиздат, 2001, 78 с.
17. Lewis J.W. Recent Development in Phisical Ice Modeling. Offshore Technol. Conf. Houston. Texas, 1982. Vol. 4. P. 493–498.
18. Козин В.М., Онищук А.В., Марьин Б.Н. Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов. Владивосток: Дальнаука, 2005, 191 с.

References

1. Kheisin D.E. Ice cover dynamics. L.: Gidrometeoizdat, 1967, 216 p.
2. Kozin V.M., Onischuk A.V. Model studies of wave formation in a continuous ice cover due to the movement of a submarine // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 1994. No. 2. P. 78-81
3. Zemlyak V.L., Kozin V.M., Vasilyev A.S. Experimental determination of the motion parameters of a submerged body and wave formation in ice conditions // Marine Intellectual Technologies. 2023. No. 3-3. Vol. 61. P. 77-87. https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.047
4. Sturova I.V., Tkacheva L.A. Behavior of floating ice cover under external loads (review). Applied Mechanics and Technical Physics, 2025, Vol. 391. No. 3. P. 3-55. http://dx.doi.org/10.15372/PMTF202415617
5. Malenko Zh.V., Yaroshenko A.A. Flexural-gravity waves in an ice cover exited by periodically varying moving perturbations // Fluid Dynamics. 2024. Vol. 59. № 3. P. 415-426. https://doi.org/10.1134/S0015462824602213
6. Korobkin A.A., Khabakhpasheva T.I. Consistent models of flexural-gravity waves in floating ice // Journal of Marine Science and Engineering. 2025. Vol. 13. No. 6. 1191. https://doi.org/10.3390/jmse13061191/
7. Sturova I.V. The effect of a crack in an ice sheet on the hydrodynamic characteristics of a submerged oscillating cylinder // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2015. Vol. 79. No. 2. P. 170- https://doi.org/178.10.1016/j.jappmathmech.2015.07.008
8. Kozin V.M., Chizhumov S.D., Zemlyak V.L. Influence of ice conditions on the effectiveness of the resonant method of breaking ice cover by submarines // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2010. Vol. 51. No. 3. P. 398-404. https://doi.org/10.1007/s10808-010-0054-6
9. Dawson E. An investigation into the effects of submergence depth, speed and hull length-to-diameter ratio on the near-surface operation of conventional submarines: Thesis … Master of Philosophy / Dawson E.; University of Tasmania. Hobart, 2014. 214 p.
10. Zemlyak V.L., Kozin V.M. Ice tank of laboratory ice technology // Vestnik, Quart. J. of Amur State University after Sholom-Aleichem. 2021. Vol. 42. P. 19–31. https://doi.org/10.24412/2227-1384-2021-142-19-31
11. Voitkunsky Ya.I. Resistance to the movement of ships. L.: Shipbuilding, 1988, 288 p.
12. Mackay M.A. Review of Sting Support Interference and Some Related Issues fo the Marine Dynamic Test Facility (MDTF). St. John's, Newfoundland: Defence Research Establishment Atlantic, 1993. 59 p.
13. Anderson B., Chapuis M., Erm L., Fureby C., Giacobello M., Henbest S., Jones D., Jones M., Kumar C., Liefvendahl M., Manovski P., Norrison D., Quick H., Snowden A., Valiyff A., Widjaja R., Woodyatt B. Experimental and computational investigation of a generic conventional submarine hull form / In: 29th Symposium on naval hydrodynamics, Gothenburg, Sweden, 26–31 August 2012.
14. Hama F.R., Long J.D., Hegarty J.C. On Transition from Laminar to Turbulent Flow // Journal of Applied Physics. 1957. Vol. 28. P. 388–394. https://doi.org/10.1063/1.1722760.
15. Nogid L.M. Simulation of the movement of the vessel in a continuous ice field and in broken ice. Proceedings of LCI. 1959. Issue. 28, pp. 179–185.
16. Stepanyuk A.I. Technologies for testing and modeling sea ice. St. Petersburg Hydrometeoizdat, 2001, 78 p.
17. Lewis J.W. Recent Development in Phisical Ice Modeling. Offshore Technol. Conf. Houston. Texas, 1982. Vol. 4. P. 493–498.
18. Kozin V.M., Onischuk A.V., and Mar'in B.N. Ice-breaking ability of flexural-gravity waves from the movement of objects. Vladivostok: Dalnauka, 2005, 191 p.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Земляк Виталий Леонидович, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий НОЦ «АйсТех», Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, 679015, г. Биробиджан, ул. Широкая, 70а, e-mail: vellkom@list.ru

Козин Виктор Михайлович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий, Институт машиноведения и металлургии Хабаровского ФИЦ ДВО РАН, 681005, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1, e-mail: kozinvictor@rambler.ru

Vitaliy I. Zemlyak, Ph.D. (Phys & Math), associate professor, chief researcher, Head of the laboratory of ice technology, Sholom-Aleichem Priamursky State University, Shirokaya, 70a, Birobidzhan, 679015, Russian Federation, e-mail: vellkom@list.ru

Victor M. Kozin, Dr. Sci. (Eng), Professor, Chief Researcher of the Laboratory for the Problems of Creation and Processing of Materials and Products, Institute of Machine Science and Metallurgy of Khabarovsk FEB RAS, Metallurgov, 1, Komsomolsk-on-Amur St, 681005, Russian Federation, e-mail: kozinvictor@rambler.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 26.05.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 29.05.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 31.05.2026.

Научная статья
УДК 532.526.2
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.030

Встречное движение нагрузок по ледяной переправе

Козин В.М.[1] kozinvictor@rambler.ru
[1]Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук

Аннотация. При освоении северных территорий нашей страны для доставки грузов в зимний период приходится использовать ледяной покров в качестве автозимников, ледяных переправ, грузонесущих платформ, а иногда и взлетно-посадочных полос для самолетов. Однако, изучение работы ледяного покрова под нагрузкой для расчета его предельной несущей способности еще недостаточно. При движении по автозимникам и ледяным переправам, как и при эксплуатации любых дорог, всегда предусматривается возможность встречного движения транспортных средств. Поскольку перемещение по ледяному покрову какой-либо нагрузки всегда сопровождается изгибными колебаниями льда, то при их групповом движении неизбежно будет происходить взаимодействие возникающих волновых систем. В определенных условиях при этом возможно резонансное увеличение их амплитуды, приводящее к разрушению ледяного покрова даже при незначительной интенсивности нагрузок, движущихся навстречу другу. Таким образом, при встречном движении нагрузок может происходить значительное уменьшение несущей способности ледяного покрова. Для ее оценки в работе рассмотрено изменение напряженно-деформированного состояния ледяного покрова для данного случая эксплуатации ледяной переправы. Исследования проводились с целью изучения влияния взаимного расположения нагрузок, движущихся встречным курсом с резонансными скоростями при их сближении и удалении друг от друга, на возникающие во льду максимальные прогибы и изгибные напряжения. При решении задачи лед рассматривался в видеизотропной вязкоупругой пластины, лежащей на упругом основании гидравлического типа. В заключении приведены рекомендации для повышения безопасности эксплуатации ледяных переправ транспортными средствами.
Ключевые слова: ледяная переправа, нагрузки, встречное движение, напряженно-деформированное состояние, разрушение.
Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Института машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН.
Для цитирования: Козин В.М. Встречное движение нагрузок по ледяной переправе. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 54—58. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.030

Originalarticle
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.030

Counter-flow of loads across the ice crossing

Viktor M. Kozin[1] kozinvictor@rambler.ru
[1]KhabarovskFederalResearchCenter of the Far Eastern Branch of the RussianAcademy of Sciences

Abstract. When developing the northern territories of our country, it is necessary to use the ice cover as winter roads, ice crossings, cargo-carrying platforms, and sometimes as runways for aircraft, in order to deliver cargo during the winter period. However, the study of the ice cover's behavior under load is not sufficient to calculate its maximum load-bearing capacity. When driving on winter roads and ice crossings, as well as when using any roads, it is always necessary to consider the possibility of oncoming traffic interaction of the resulting wave systems will inevitably occur during their group movement. Under certain conditions, this can lead to a resonant increase in their amplitude, resulting in the destruction of the ice cover even with a low intensity of loads moving towards each other. Therefore, the counter-moving loads can significantly reduce the ice cover's bearing capacity. To assess this, the paper examines the changes in the stress-strain state of the ice cover for this specific case of ice crossing operation. The research was conducted to study the effect of the mutual arrangement of loads moving in opposite directions at resonant speeds as they approach and move away from each other, on the maximum deflections and bending stresses that occur in the ice. In solving the problem, the ice was considered as an isotropic viscoelastic plate resting on an elastic hydraulic foundation. The paper concludes with recommendations for improving the safety of ice crossings for vehicles.
Key words: ice crossing, loads. oncoming traffic, stress-strain state, destruction.
Funding: The work was carried out as part of the state assignment of the Institute of Engineering and Metallurgy of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.
For citation: Kozin V.M. Counterflow of Loads on an Ice Crossing. Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 54—58. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.030

Введение

Слабая развитость дорожной сети северных территорий нашей страны приводит к необходимости для доставки грузов в зимний период использовать ледяной покров в качестве автозимников, ледяных переправ, грузонесущих платформ, а иногда и взлетно-посадочных полос для самолетов. Так, по данным МЧС ежегодно в России официально

© Козин В.М. 2026

действуют от 400 до 500 ледяных переправ, протяженность которых составляют от десятков метров до десятков километров (оз. Байкал, р. Енисей и др.). Только на территории Ямало-Ненецкого автономного округа зимой вводится в эксплуатацию более 60 ледяных переправ протяженностью более 110 км. В большинстве эти временные дороги являются единственно возможным способом пересечения многочисленных рек, озер, болот и пр. водных препятствий. По данным Комитета Совета Федерации по делам Севера и малочисленных народов более 70% населения не имеют возможности круглогодичного выхода на дороги с твердым покрытием, поэтому использование естественного ледяного покрова в качестве ледяных переправ через реки и водохранилища в условиях низких устойчивых температур известно очень давно. Однако, изучение работы ледяного покрова под нагрузкой для расчета его предельной несущей способности начаты сравнительно недавно.

Особенностью эксплуатации ледяных переправ являются малые интенсивность и скорость движения транспортных средств при значительной их грузоподъемности. При движении по автозимникам и ледяным переправам, как и при эксплуатации любых дорог, всегда существует возможность встречного движения транспортных средств. Поскольку перемещение по ледяному покрову какой-либо нагрузки всегда сопровождается изгибными колебаниями льда, в том числе и возбуждением изгибно-гравитационных волн (ИГВ) [1], то при их групповом движении неизбежно будет происходить взаимодействие возникающих волновых систем, вызывающих их интерференцию. В определенных условиях возможно резонансное увеличение их амплитуды, приводящее к разрушению ледяного покрова даже при незначительной интенсивности нагрузок, движущихся навстречу друг другу (рис. 1).Так, из этого рисунка следует, что до момента встречи автомобилей несущая способность переправы была достаточной. Очевидно, что при уменьшении расстояния между ними произошло значительное увеличение прогибов льда, что привело к провалу автомобилей еще до момента их максимального сближения. Отсюда можно сделать заключение, что при встречном движении нагрузок может происходить значительное уменьшение несущей способности ледяного покрова. Это следует учитывать при определении безопасной толщины льда [2]. С этой целью в работе рассмотрено изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) ледяного покрова для данного случая эксплуатации ледяной переправы.



Рис. 1. Разрушение ледяного покрова при встречном движении автомобилей

Результаты исследований

Исследования проводились с целью изучения влияниявзаимного расположения нагрузок, движущихся встречным курсом с резонансными скоростями[1] при их сближении и удалении друг от друга, на возникающие во льду максимальные деформации и изгибные напряжения.

При решении задачи лед рассматривался в виде вязкоупругой пластинытолщиной h и плотностью $\rho_л$, лежащей на жидкости плотностью $\rho_в$, По пластине движется распределенная нагрузка q со скоростью u. Жидкость рассматривалась идеальной и несжимаемой, а ее движение - потенциальным.

Бесконечно малые колебания вязкоупругой пластины записывались уравнением [3]:

$$\frac{Gh^3}{3}\left(1+\tau_\phi\frac{\partial}{\partial t}\right)\nabla^4 w+\rho_в g w+\rho_л h\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}+\rho_в\left.\frac{\partial \Phi}{\partial t}\right|_{z=0}=-q\,, \qquad (1)$$

где G – модуль упругости льда при сдвиге;

g – ускорение силы тяжести;

τ_ϕ – время релаксации деформаций;

t – время.

Выражение для $w(x,y)$ при решении уравнения (1) получено в виде [4]:

$$w(x,y)=\frac{4q_0}{\pi^2\rho_в u^2}\int_0^\infty \lambda^2 th(\lambda H)\times$$

$$\int_0^\lambda \frac{\cos\left(y\sqrt{\lambda^2-\alpha^2}\right)\sin\left(\alpha\frac{L}{2}\right)\sin\left(\frac{B}{2}\sqrt{\lambda^2-\alpha^2}\right)\left(\cos(\alpha x)\xi+\sin(\alpha x)\eta\right)}{\alpha\left(\lambda^2-\alpha^2\right)\left(\xi^2+\eta^2\right)}d\alpha d\eta\,, \qquad (2)$$

$$\xi=-\frac{Gh^3\lambda^5\,\mathrm{th}(\lambda H)}{3\rho_в u^2}-\frac{g\lambda\,\mathrm{th}(\lambda H)}{u^2}+\frac{\rho_л h\alpha^2\lambda\,\mathrm{th}(\lambda H)}{\rho_в}+\alpha^2,\eta=\frac{Gh^3\lambda^5\tau_\phi\,\mathrm{th}(\lambda H)}{3\rho_в u}\alpha\,,$$

где q_0 – интенсивность нагрузки, действующей на прямоугольную область длиной L и шириной B;

H – глубина водоема.

Используя принцип суперпозиций, т.е. формулу

$$w(x,y)=w(x,y)+w(x-s,y-L_y),$$

были получены суммарные прогибы пластины при движении по ней двух нагрузок, находящихся на расстоянии $s=l-u\cdot t$ по оси x в момент времени t и на расстоянии L_y по оси y, учитывая, что начальное расстояние между ними было l.

При движении нагрузок навстречу друг к другу (на расстоянии L_y друг от друга в направлении движения, т.е. в поперечном направлении) рассматривалось их сближение, момент встречи и затем удаление друг от друга.

Численные расчеты проводились при следующих значениях: $L=30{,}2$ м; $B=13{,}1$ м; $q_0=4\cdot10^3$ Н/м²; $\rho_л=900$ кг/м³; $\rho_в=1000$ кг/м³; $G=3{,}76\cdot10^8$ Н/м²; $\mu=0{,}33$ $\tau_ф=0{,}69$ с; $H=5$ м; $h=0{,}5$ м; $u=6{,}5$ м/с; $L_y=13{,}1$ м; $l=400$ м (величины параметров L, B, q_0 соответствовали СВП «Мурена»).

На рис. 2 представлены прогибы ледяного покрова при движении по нему одной и двух нагрузок, движущихся встречным курсом.

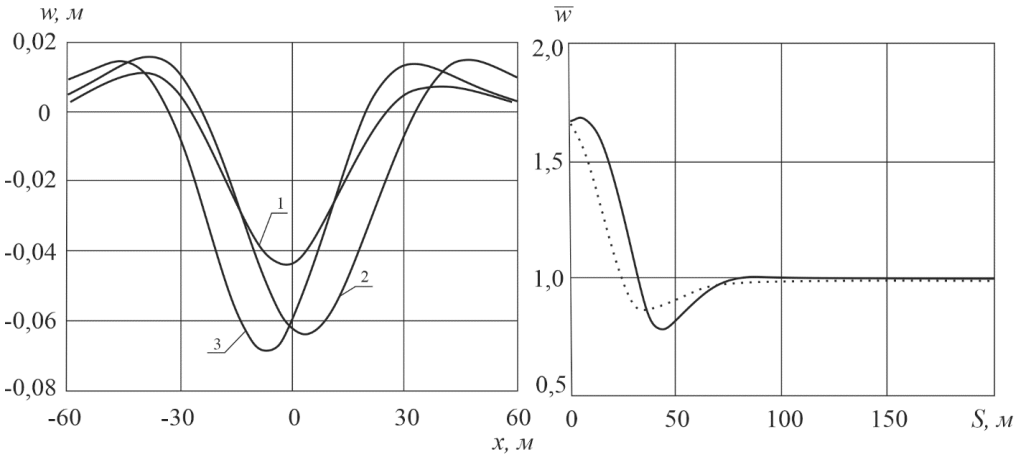


Рис.2. Зависимость прогибов ледяного покрова w от режимов движения нагрузок: 1 – движение одной нагрузки; 2 – сближение двух нагрузок (t=60с, s=10м),3 – удаление нагрузок друг от друга (t=64с,s=16м); зависимость относительных прогибов ледяного покрова $\overline{w}$:сплошная линия - движение двух нагрузок при их сближении; пунктирная линия- при их удалении

Относительные прогибы $\overline{w}$, полученные как отношение прогиба при движении двух нагрузок встречным курсом к прогибу при движении одиночной нагрузки, представлены на рис. 3.

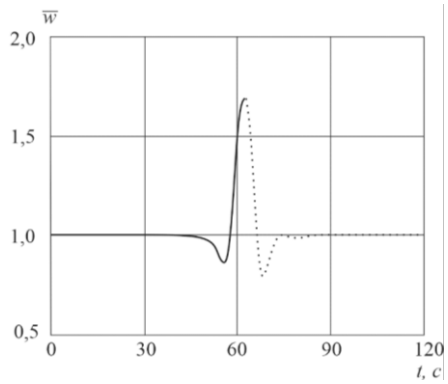


Рис. 3. Зависимость относительных прогибов ледяного покрова от взаимного расположения нагрузок:сплошная линия - движение двух нагрузок при их сближении; пунктирная линия- при их удалении

В работе [5] отмечено, что полное разрушение ледяного покрова ИГВ происходит при достижении теоретической плотности потенциальной энергии при его изгибе определенного уровня, величина которой зависит в основном от возникающих максимальных изгибных напряженийσx. Поэтому изменение уровня НДС, т.е. несущей способности ледяной переправы, было предложено оценивать по изменению этих напряжений

$$\sigma_x=\frac{6M_x}{h^2},\text{где } M_x=-\frac{Gh^3}{6(1-\mu)}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(w+\tau_ф\frac{\partial w}{\partial t}\right)+\mu\frac{\partial^2}{\partial y^2}\left(w+\tau_ф\frac{\partial w}{\partial t}\right)\right). \quad (3)$$

После подстановки (2) в (3) получены выражения для максимальных нормальных напряжений по толщине пластины:

$$M_x = \frac{2Gh^3 q_0}{3(1-\mu)\pi^2 \rho_в u^2} \int_0^\infty \lambda^2 th(\lambda H) \int_0^\lambda \cos\left(y\sqrt{\lambda^2-\alpha^2}\right)\sin\left(\alpha\frac{L}{2}\right)\sin\left(\frac{B}{2}\sqrt{\lambda^2-\alpha^2}\right)\times$$

$$\times\left(\alpha^2+\mu\left(\lambda^2-\alpha^2\right)\right)\frac{\left(\left(\cos(\alpha x)+\tau_\phi\cdot u\cdot\alpha\cdot\sin(\alpha x)\right)\xi+\left(\sin(\alpha x)-\tau_\phi\cdot u\cdot\alpha\cdot\cos(\alpha x)\right)\eta\right)}{\alpha\left(\lambda^2-\alpha^2\right)\left(\xi^2+\eta^2\right)}d\alpha d\lambda .$$

Результаты расчетов напряжений по перечисленным зависимостям и указанных выше исходных данных представлены на рис.4.

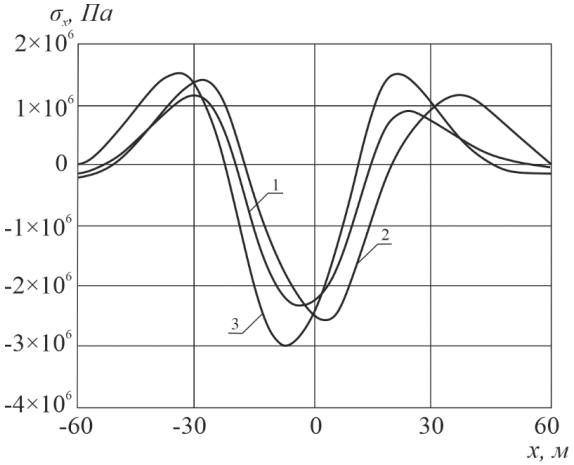


Рис.4. Зависимость напряжений σ_x от режимов движения нагрузок: 1 – движение одной нагрузки; 2 – сближение двух нагрузок (t=60c,s=10м), 3 – удаление нагрузок друг от друга (t=64c,s=16м)

На рис. 5 приведены зависимости максимальных относительных напряжений $\overline{\sigma}_x$:

$$\overline{\sigma}_x = \frac{\sigma_x}{\sigma_u},$$

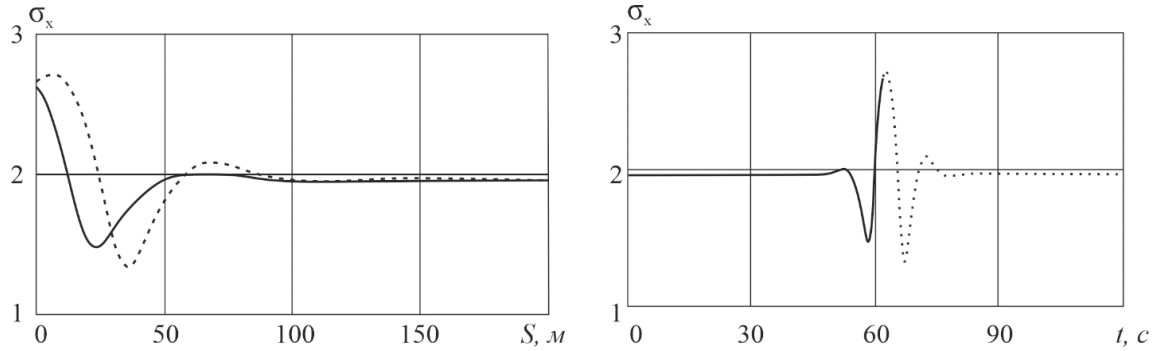


Рис. 5. Зависимость напряжений $\overline{\sigma}_x$ от режимов движения нагрузок: сплошная линия – сближение двух нагрузок (t=60c,s=10м), пунктирная линия – удаление нагрузок друг от друга (t=64c,s=16м)

Заключение

Из результатов расчетов следует, что при движении двух нагрузок навстречу друг другу интенсивность ИГВ за счет их интерференции изменяется, оказывая существенное влияние на НДС ледяного покрова только при их сближении и встречи. В соответствии с этим при эксплуатации ледяных переправ с предельно допустимой минимальной толщиной льда транспортным средствам следует избегать скоростей, близкихк резонансным, а при их сближении соблюдать значительную дистанцию между бортами.

Литература

1. Хейсин, Д. Е. Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 215 с.
2. Иванов К.Е., Песчанский И.С. Грузоподъемность ледяного покрова и устройство дорог на льду. Труды Арктического научно – исследовательского института Главного управления Северного морского пути при Совете министров СССР. Москва, Ленинград. Издательство Главсевморпути. 1949, т.23. 182 с.
3. Козин В.М., Земляк В.Л. Рогожникова Е.Г. Повышение эффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова при парном движении судов на воздушной подушке.// ПМТФ. 2017. Т. 58, №2. С. 188-192.
4. KozinV.M., ZemlyakV.L., RogozhnikovaE. G. Studies of Influence of Water Area Depth on the Nature of Destruction of an Ice Cover when Paired Loads are Moving over the Ice Cover. The twenty- -sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE-2016). June 26-July 1, June 15-20. Rhodes, Greece, pp. 1153-1157.
5. Козин В.М. Результаты экспериментально-теоретических исследований возможностейрезонансного метода разрушения ледяного покрова // Изв. РАН. МТТ.2023, № 3. с.3-20.
6. Петров, И.Г. Выбор наиболее вероятных значений механических характеристик льда. ТрудыААНИИ. 1976. Т.331. С.4-41.

References

1. Heisin, D. E. Ice cover dynamics. L.: Hydrometeoizdat, 1967. 215 pp.
2. Ivanov K.E., Peschansky I.S. Carrying capacity of ice cover and arrangement of roads on ice. Proceedings of the Arctic Research Institute of the Main Directorate of the Northern Sea Route under the Council of Ministers of the USSR.Moscow, Leningrad.GlavsevmorputPublishingHouse. 1949, vol. 23. 182 pp.
3. Kozin V.M., Countryman V.L. Rogozhnikova E.G. Increasing the effectiveness of the resonant method of breaking the ice cover during the paired movement of hovercraft .//PMTF. 2017. VOL. 58, NO. 2. S. 188-192.
4. KozinV.M., ZemlyakV.L., RogozhnikovaE. G. Studies of Influence of Water Area Depth on the Nature of Destruction of an Ice Cover when Paired Loads are Moving over the Ice Cover. The twenty- -sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE-2016). June 26-July 1, June 15-20. Rhodes, Greece, pp. 1153-1157.
5. Kozin V.M. The results of experimental and theoretical studies of possibilities resonance method of ice cover destruction//Rev. RAS. MTT.2023, № 3.p.3-20.
6. Petrov, I.G. Selection of the most probable values of mechanical characteristics of ice. AARI proceedings. 1976. T.331. S.4-41.

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

Козин Виктор Михайлович, доктор технических наук, 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/thearticlewassubmitted 02.03.2026.
Одобрена после рецензирования/approvedafterreviewing 20.06.2026.
Принятакпубликации/acceptedforpublication 25.06.2026.

Научная статья
УДК 629.5.052
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.031

Разработка автоматизированной системы измерения и обработки углов кренования судна

Русановский С.А.[1] s.rusanovskiy@narfu.ru**, Грамотин Р.И.**[1] roma.gramotin@mail.ru**,**
Музыка М.М.[1] m.muzyka@narfu.ru, **Платоненков С.В.**[1] s.platonenkov@narfu.ru
[1]Северный (Арктический) федеральный университет им М.В. Ломоносова

Аннотация. В статье представлены результаты разработки автоматизированной системы для измерения и обработки углов кренования судна, построенной на базе промышленного MEMS-инклинометра и 32-битного микроконтроллера. Проведён теоретический анализ погрешностей традиционных методов (маятниковые вески, механический инклинограф) и электронных средств измерения. Выполнен анализ погрешностей классического метода кренования на основе данных десяти судов различных типов, показавший, что даже при идеальных условиях погрешность определения аппликаты центра тяжести судна может достигать нескольких десятков сантиметров из-за систематических ошибок, связанных с изменением метацентра и погрешностями гидростатических данных. Сравнение с альтернативными методами определения центра тяжести судна подтверждает наличие этих систематических ошибок. Предложенная автоматизированная электронная система измерения и обработки углов кренования позволяет минимизировать как случайные, так и систематические составляющие погрешности за счёт автоматизации, цифровой фильтрации и статистически обоснованной обработки, что согласуется с выводами современных исследований в данной области. Разработанный комплекс обеспечивает полную автоматизацию измерений, исключает субъективные ошибки оператора и может служить доступной альтернативой дорогостоящим коммерческим системам. Разработана структурная и электрическая схемы устройства, реализован алгоритм цифровой фильтрации на основе экспоненциального скользящего среднего для подавления низкочастотных помех. Создано микропрограммное обеспечение для автономной регистрации данных на карту памяти и приложение для ПК для постобработки, включающее статистическую обработку по методу наименьших квадратов. Стендовые испытания подтвердили статическую точность системы с максимальной абсолютной погрешностью 0,004°, что значительно превышает требования РМРС.
Ключевые слова: кренование судна, инклинометр, микроконтроллер, цифровая фильтрация, экспоненциальное скользящее среднее, MEMS-датчик, остойчивость, метацентрическая высота, Российский морской регистр судоходства.
Для цитирования: Русановский С.А., Грамотин Р.И., Музыка М.М., Платоненков С.В. Разработка автоматизированной системы измерения и обработки углов кренования судна, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 59—65. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.031

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.031

Development of an Automated System for Measuring and Processing Ship Heeling Angles

Sergei A. Rusanovskiy[1] s.rusanovskiy@narfu.ru, **Roman I. Gramotin**[1] roma.gramotin@mail.ru,
Mikhail M. Muzyka[1] m.muzyka@narfu.ru, **Sergei V. Platonenkov**[1] s.platonenkov@narfu.ru
[1]Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Russian Federation

Abstract. This article presents the results of the development of an automated system for measuring and processing a ship's heeling angles, based on a commercial MEMS inclinometer and a 32-bit microcontroller. A theoretical analysis of the errors in traditional methods (pendulum weights, mechanical inclinometers) and electronic measuring devices was conducted. An analysis of the errors in the classical heeling method was performed based on data from ten vessels of various types, which showed that even under ideal conditions, the error in determining the ship's center of gravity can reach several tens of centimeters due to systematic errors associated with changes in the metacenter and errors in hydrostatic data. A comparison with alternative methods confirms the presence of these systematic errors. The proposed automated electronic system for measuring and processing heeling angles minimizes both random and systematic error components through automation, digital filtering, and statistically sound processing, which is consistent with the conclusions of recent studies in this field. The developed system ensures full automation of measurements, eliminates subjective operator errors, and can serve as an affordable alternative to expensive commercial systems. The device's block diagram and electrical schematic have been developed, and a digital filtering algorithm based on the exponential moving average (EMA) has been implemented to suppress low-frequency noise. Firmware was created for autonomous data logging to a memory card, along with a desktop application for post-processing, including statistical analysis using the least squares method. Bench tests confirmed the system's static accuracy with a maximum absolute error of 0.004°, which significantly exceeds the requirements of the Russian Maritime Register of Shipping.
Key words: inclining experiment, inclinometer, microcontroller, digital filtering, exponential moving average, MEMS sensor, stability, metacentric height, Russian Maritime Register of Shipping.

© Русановский С.А., Грамотин Р.И., Музыка М.М., Платоненков С.В. 2026

For citation: Sergei A. Rusanovskiy, Roman I. Gramotin, Mikhail M. Muzyka, Sergei V. Platonenkov, Development of an Automated System for Measuring and Processing Ship Heeling Angles, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 59—65. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.031

Введение

Определение положения центра тяжести судна является одной из ключевых задач при его постройке, модернизации и ремонте. Для решения этой задачи проводится обязательное испытание — опыт кренования, в ходе которого судно наклоняют перемещением груза известной массы, измеряют установившийся угол крена и рассчитывают метацентрическую высоту (GM). Результаты кренования напрямую влияют на допуск судна к эксплуатации, а все измерения должны выполняться в строгом соответствии с требованиями Российского морского регистра судоходства (РМРС) и Международного кодекса остойчивости судов в неповрежденном состоянии 2008 года (Кодекс ОНС 2008) [1, 2].

Традиционно для измерения углов наклона при креновании применяются маятниковые вески и механические инклинографы (инклинограф Амаева). Маятниковые вески имеют погрешность около ±0,019° [3]. Механические инклинографы высокого класса обеспечивают точность 0,03–0,06°, однако на практике из-за трения, люфтов, температурных дрейфов и субъективности снятия отсчётов реальная погрешность часто оказывается выше [4]. Оба метода трудоёмки, подвержены влиянию человеческого фактора и не позволяют автоматизировать процесс.

Современные MEMS-инклинометры лишены этих недостатков: они компактны, точны (до 0,001°), энергоэффективны и легко интегрируются в автоматизированные системы [5]. На рынке представлен ряд коммерческих решений для оценки угла крена судов [6–9], однако их высокая стоимость и закрытая архитектура ограничивают применение.

Кроме того, классический метод кренования содержит значительные неопределённости, связанные с допущением о неизменности метацентра и погрешностями гидростатических данных. Анализ неопределённостей для десяти судов [10] показал, что погрешность аппликаты центра тяжести судна может достигать ±0,47 м. Альтернативные методы (графический, полярный, обобщённый) устраняют зависимость от метацентра, но их точность ограничена качеством первичных измерений [11, 12]. Высокоточные электронные инклинометры способны существенно снизить эти неопределённости [13].

Цель работы — разработка автоматизированной системы измерения и обработки углов кренования, удовлетворяющей требованиям РМРС, базирующейся на доступной элементной базе и обеспечивающей полную автоматизацию измерительного процесса.

1. Теоретический анализ точности методов измерения угла крена при креновании

1.1. Основное уравнение кренования и связь погрешностей

Метацентрическая высота (*h* или *GM*) определяется по формуле [3]:

$$GM = \frac{p \cdot l}{\Delta \cdot \tan\theta}, \quad (1)$$

где p — масса перемещаемого груза, т; l — плечо перемещения, м; Δ — водоизмещение, т; θ — угол крена, град.

Относительная погрешность метацентрической высоты методом полного дифференциала:

$$\frac{\delta GM}{GM} = \sqrt{\left(\frac{\delta p}{w}\right)^2 + \left(\frac{\delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta}{\Delta}\right)^2 + \left(\frac{\delta \theta}{\sin\theta \cdot \cos\theta}\right)^2}. \quad (2)$$

Для малых углов (<10°) упрощается до:

$$\frac{\delta GM}{GM} \approx \sqrt{\left(\frac{\delta p}{w}\right)^2 + \left(\frac{\delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta}{\Delta}\right)^2 + \left(\frac{\delta \theta}{\theta}\right)^2}. \quad (3)$$

Пренебрегая погрешностями массы, плеча и водоизмещения (они обычно малы), получаем основное соотношение:

$$\frac{\delta GM}{GM} \approx \frac{\delta \theta}{\theta}. \quad (4)$$

1.2. Требования к точности измерения угла

Согласно литературе [1, 10], допустимая погрешность GM составляет ±5 % (стандартные), ±2 % (ответственные), ±1 % (прецизионные). По формуле (4) определяем требуемую точность угла (табл. 1).

Таблица 1

Требуемая точность измерения угла крена для обеспечения заданной погрешности метацентрической высоты

Класс точности	δGM/GM, %	Требуемая δθ при θ = 2°	Требуемая δθ при θ = 4°	Требуемая δθ при θ = 6°
Стандартный	5	0,10°	0,20°	0,30°
Высокий	2	0,04°	0,08°	0,12°
Прецизионный	1	0,02°	0,04°	0,06°

1.3. Анализ погрешностей традиционных методов

Маятниковый отвес. Погрешность $\delta\theta_{pend} = \Delta x / L$. При $L = 5$ м и $\Delta x = 2$ мм получаем ≈0,023°. Однако на практике длина обычно меньше, а точность отсчёта хуже, плюс влияние ветра и вибраций.

Механический инклинограф. Прецизионные модели дают 0,03–0,06°, но из-за трения, люфтов и температурных эффектов типичная погрешность составляет 0,05–0,15° [4].

Влияние вибраций и волнения. Оценивается по формуле $\delta\theta_{vib} = A \cdot \omega^2 / g$. При $A = 1$ мм и $f = 0{,}1$ Гц погрешность ничтожна (~0,0023°), но при частотах 5–50 Гц от механизмов она может увеличиваться. Традиционные методы не фильтруют такие помехи.

1.4. Сравнительная характеристика методов

Сравнение измерительных устройств по основным эксплуатационным параметрам приведено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительная характеристика методов измерения углов при креновании

Параметр	Маятник	Механический инклинограф	Электронный датчик (MEMS)
Погрешность, °	~0,02	0,03–0,06 (типично 0,1)	0,005–0,01
Чувствительность к вибрациям	Высокая	Средняя	Низкая (фильтрация)
Автоматизация записи	Нет	Частичная	Полная
Трудоёмкость	Высокая	Средняя	Низкая

2. Анализ погрешностей классического метода и альтернативных подходов

2.1. Погрешности классического метода (Ozsayan & Taylan, 2019)

В работе [10] выполнен детальный анализ погрешностей гидростатических элементов для десяти судов различных типов. Показано, что даже при тщательном проведении эксперимента погрешность определения метацентрической высоты может достигать ±0,47 м (для крупных судов) и ±0,09 м для малых. Основные источники: погрешность осадки, плотности воды, угла крена, гидростатических данных и допущение о неизменности метацентра. Эти ошибки особенно критичны для судов с малым запасом остойчивости.

2.2. Альтернативные методы (Radoš et al., 2022)

В работе [11] сравнены классический, графический, полярный и обобщённый методы на четырёх речных судах. Альтернативные методы не используют допущение о неизменности метацентра. Различия между ними и классическим методом составили от 0,7 % до 3,8 % по аппликате центра тяжести судна, что указывает на наличие систематической ошибки в классическом подходе. Альтернативные методы дают близкие результаты друг к другу, что подтверждает их надёжность. Однако их точность ограничена качеством исходных данных (KN, HZ), которые также могут содержать ошибки.

2.3. Высокоточные измерения с использованием электронных инклинометров (Gabil et al., 2021)

В [13] представлена экспериментальная установка с инклинометром точностью 0,003°, позволившая определять положение центра тяжести с погрешностью в несколько миллиметров и момент инерции с ошибкой <1 %. Это подтверждает, что применение прецизионных электронных датчиков радикально снижает инструментальную составляющую неопределённости.

2.4. Обобщённый вывод

Классический метод содержит значительные систематические ошибки, связанные с допущениями и гидростатическими данными. Альтернативные методы позволяют их уменьшить, но их точность зависит от качества измерений угла. Поэтому использование высокоточного электронного инклинометра с фильтрацией и автоматической регистрацией является ключевым для минимизации как случайных, так и систематических погрешностей.

2.5. Статистическая обработка результатов кренования

Для получения достоверных значений GM необходимо корректно обрабатывать массив измерений. Международные стандарты требуют не менее 8 измерений угла при разных положениях груза [1, 11]. Это обосновано статистически: при n=8 степень свободы v=7, коэффициент Стьюдента $t_7(0{,}95)=2{,}365$, а среднеквадратическая погрешность среднего $\sigma_{ср} = \sigma/\sqrt{n} = 0{,}354\sigma$, что обеспечивает приемлемую точность.

По методу наименьших квадратов (МНК) строится линейная зависимость момента $M = w \cdot d$ от $\tan\theta$:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{n} M_i \cdot \tan\theta_i}{\sum_{i=1}^{n} M_i^2}, \qquad GM = \frac{1}{\Delta \cdot k}.$$

Погрешность коэффициента:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\tan\theta_i - kM_i)^2}{(n-2)\sum M_i^2}}, \qquad \delta GM = GM \cdot \frac{\sigma_k}{k}.$$

При типовых условиях и n=8 статистическая погрешность GM составляет около ±8,3 %, что соответствует стандартам по повторяемости. **Однако это лишь случайная составляющая.** Полная неопределённость классического метода, как показано в [10], включает систематические ошибки (изменение метацентра, погрешности гидростатики), которые могут давать погрешность аппликаты центра тяжести судна до 0,47 м. Предлагаемая электронная система снижает случайную погрешность за счёт многократных измерений (частота 10 Гц даёт сотни отсчётов) и фильтрации, а систематическую — за счёт высокой статической точности датчика и возможности применения альтернативных расчётных методов, не зависящих от метацентра.

3. Разработка автоматизированной системы

3.1. Основные элементы автоматизированной системы

Инклинометр осуществляет преобразование физического угла крена судна в эквивалентный электрический сигнал, который обрабатывается контроллером. Контроллер осуществляет обработку полученного сигнала и сохраняет полученные данные в память MicroSD для последующей дообработки на ЭВМ. Напряжение питания подается на устройство со встроенного аккумулятора.

Разработанный измерительный комплекс конструктивно разделен на выносной датчик BWM427 и центральный вычислительный блок, размещенный в ударопрочном герметичном кейсе. Устройство выполнено на базе промышленного

инклинометра (точность 0,01°, разрешение 0,001°, интерфейс RS-485), микроконтроллера STM32F411CEU6 [14], дисплея ILI9341, модуля MicroSD, RTC DS3231, аккумуляторной сборки 3S Li-Ion с BMS и DC-DC преобразователем. Все модули размещены в герметичном кейсе IP67. Размеры кейса 240x144x70 мм, вес собранного устройства – до 1 кг. Расчетное время автономной работы комплекса составляет более 23 часов при непрерывной максимальной нагрузке. Общий вид устройства представлен на рис. 1. Устройство в текущем варианте исполнения позволяет подключать два датчика.



Рис. 1. Общий вид инженерного образца устройства

3.2. Функции программного обеспечения

В микроконтроллере программа обеспечивает опрос датчика с заданной частотой, фильтрацию с помощью медианного фильтра и фильтра экспоненциального скользящего среднего. Медианный фильтр реализован с окном по трем последним измерениям. Данный алгоритм нечувствителен к нетипичным аппаратным выбросам и эффективно отсекает резкие аномальные всплески значений, передавая на следующий этап обработки достоверный измерительный сигнал. Для избавления от высокочастотной составляющей судовых вибраций в прошивке использован фильтр экспоненциального скользящего среднего (Exponential Moving Average, EMA). В теории обработки сигналов данный фильтр является дискретным аналогом аналогового низкочастотного RC-фильтра первого порядка. Он выполняет функцию фильтра нижних частот, отсекая резкие всплески данных и пропуская только медленные изменения измеряемой величины. Алгоритм автоматического анализа стабильности качки судна базируется на математическом методе «скользящего окна»: контроллер непрерывно сохраняет последние десять отфильтрованных значений угла крена в кольцевой буфер, формируя массив данных за последнюю секунду (диапазон возможных частот опроса датчика – 1-50 Гц). На каждой итерации программа сканирует буфер и вычисляет разность между максимальным и минимальным значением. Если амплитуда остаточных колебаний судна за последнюю секунду не превышает указанного порогового значения, система классифицирует состояние как стабильное, выводя на дисплей разрешающий индикатор «READY». В обратном случае отображается статус «WAIT». Данный функционал исключает человеческий фактор и показывает момент полного затухания свободных колебаний для фиксации корректного статического угла крена. После обработки сигнала с инклинометра производится вывод на дисплей измеренного значения углов крена и дифферента, см. рис. 2, с последующей записью на карту памяти micro SD с временными метками для последующей идентификации. На экране дополнительно показаны дата и время, частота опроса датчика, значение коэффициента α и индикатор «READY»/«WAIT». Значение частоты опроса и коэффициента α можно изменять с помощью инкрементального энкодера, расположенного справа от тумблера включения.



Рис. 2. Общий вид информации на экране при работе устройства

Постобработка записанных на карту памяти данных осуществляется в приложении на персональной ЭВМ. В его функции входит считывание файлов данных с карты памяти, аппроксимацию по методу наименьших квадратов, расчёт координат центра масс судна и его погрешности, построение графиков и формирование отчёта в Excel. Общий вид приложения для ПК представлен на рис. 3. Более подробно методы математической обработки сигнала будут рассмотрены в следующей статье.

4. Экспериментальные исследования

4.1. Стендовые испытания статической точности

Стенд из алюминиевого профиля длиной 1500 мм наклонялся калиброванными брусками, см. рис. 4. Результаты (табл. 4) показали максимальную абсолютную погрешность 0,004°, что значительно лучше требуемых 0,01° и превосходит точность механических инклинометров.

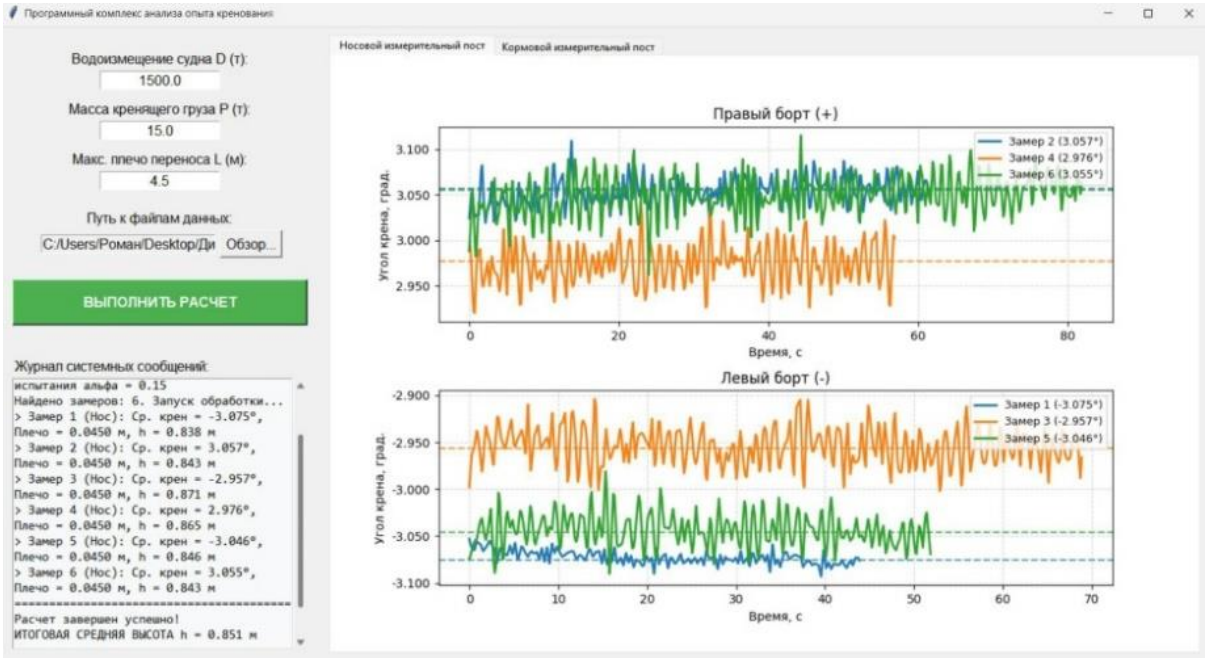


Рис. 3. Основное окно приложения для обработки полученных результатов кренования на ЭВМ

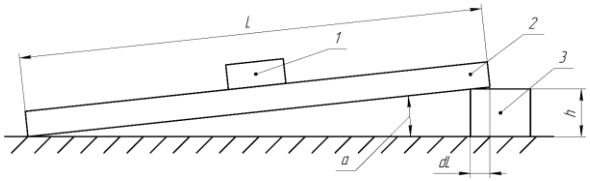


Рис. 4 – Схема статических испытаний измерительного комплекса:
1 – датчик; 2 – алюминиевый профиль; 3 – подложка

Таблица 4

Сравнение расчётных и измеренных углов

Толщина брусков, мм	Расчётный угол, °	Измеренный угол, °	Погрешность, °
3	0,114	0,110	0,004
8	0,306	0,308	0,002
12	0,459	0,456	0,003
16	0,611	0,610	0,001
25	0,956	0,958	0,002

4.2. Динамические испытания на модели

Для оценки работоспособности разработанной системы в динамических условиях были проведены испытания на макете судна в опытовом бассейне. Измерительный модуль временно фиксировался на палубе макета в районе диаметральной плоскости. В ходе эксперимента осуществлялся перенос калибровочного груза на заданное плечо с последующей регистрацией параметров кренования.

С целью проверки работы алгоритмов цифровой фильтрации на поверхности воды искусственно создавалось волнение, имитирующее внешние возмущающие воздействия при натурном креновании. Использование фильтра экспоненциального скользящего среднего позволило снизить влияние динамической составляющей качки при фиксации установившегося угла крена. По результатам обработки полученных массивов данных были рассчитаны значения метацентрической высоты (GM) (табл. 5). Разброс полученных значений составил менее 4 %, что подтверждает принципиальную работоспособность системы при наличии внешних волновых возмущений.

Таблица 5

Результаты обработки динамических испытаний

№ замера	Средний угол крена, °	GM, м
1	-3,075	0,838
2	+3,057	0,843
3	-2,957	0,871
4	+2,976	0,865
5	-3,046	0,846
6	+3,055	0,843
Среднее	—	**0,851**

5. Обсуждение

Разработанная система обеспечивает статическую точность 0,004°, что на порядок выше требований РМРС и возможностей механических инклинометров. Теоретический анализ показал, что для стандартных испытаний достаточно 0,05°, поэтому запас точности избыточен, но это полезно для ответственных случаев.

Важно различать статистическую погрешность, вычисляемую по МНК (при n≥8 составляет ~8 % для h), и полную погрешность классического метода, включающую систематические ошибки. Как показано в [10], последняя может достигать десятков сантиметров по z_g. Альтернативные методы [11] позволяют уменьшить систематическую составляющую, но их точность ограничена качеством измерений угла. Предлагаемая система сочетает высокую точность измерения угла, цифровую

фильтрацию, автоматическую регистрацию и возможность использования альтернативных расчётных подходов, что минимизирует обе составляющие погрешности. Открытая архитектура позволяет адаптировать систему под конкретные задачи.

Заключение

Разработана автоматизированная система измерения и обработки углов кренования, удовлетворяющая требованиям РМРС. Теоретически обоснованы требования к точности датчика. Спроектирована аппаратная часть, реализованы алгоритмы фильтрации и статистической обработки (МНК, обоснование n≥8). Экспериментально подтверждена статическая точность 0,004°. Система автономна, мобильна, имеет открытую архитектуру. Дальнейшие работы связаны с натурными экспериментами, сертификацией РМРС/РКО и интеграцией в судовые сети.

Литература

1. Международный кодекс по остойчивости судов в неповрежденном состоянии 2008 года (Кодекс ОНС 2008). – М.: ИМО, 2008.
2. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть IV. Остойчивость. – СПб.: РМРС, 2020.
3. Войткунский, Я. И. Справочник по теории корабля. В 3 т. Т. 2. Статика судов. Качка судов / Я. И. Войткунский. – Л.: Судостроение, 1985. – 440 с.
4. Справочник по судовым измерениям / под ред. В.А. Семёнова. – М.: Транспорт, 1990. – 320 с.
5. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден ; пер. с англ. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
6. NAVCOM DELTA 401. Судовой электронный кренометр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cirspb.ru/pdf/DELTA%20401.pdf.
7. Daniamant DanEI Electronic Inclinometer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.marinelink.com/news/daniamant-danei-electronic-inclinometer-535776.
8. Система измерения осадки СИО-ИЦ11 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.korabel.ru/news/comments/inzhenerniy_tsentr_informatsionnih_i_upravlyayushchih_sistem_predlagaet_sistemu_izmereniya_osadki_sio-its11.html.
9. Inclinosensor. Inclining test system [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.sarc.nl/hardware/inclinosensor/.
10. Ozsayan, S., Taylan, M. Another Blow on the Torn Down Wall – The Inclining Experiment // Brodogradnja. – 2019. – Vol. 70, No. 2. – P. 7–19. DOI: 10.21278/brod70207.
11. Radoš, L., Turk, A., Legović, D. Comparison Between the Classical Method of Inclining Experiment with the Recent Alternative Methods // Journal of Maritime & Transportation Science. – 2022. – No. 4. – P. 23–43. DOI: 10.18048/2022.04.23.
12. Karolius, K.B., Vassalos, D. Tearing down the wall – The inclining experiment // Ocean Engineering. – 2018. – Vol. 148. – P. 442–475. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.11.037.
13. Gabil, R., Davey, T., Nixon, E., Ingram, D.M. Accuracy Analysis of the Measurement of Centre of Gravity and Moment of Inertia with a Swing // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, No. 12. – P. 5345. DOI: 10.3390/app11125345.
14. STM32F411xC STM32F411xE. Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f411ce.pdf.
15. Смит, С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство / С. Смит. – М.: Додэка-XXI, 2012. – 720 с.
16. Оппенгейм, А. Цифровая обработка сигналов / А. Оппенгейм, Р. Шафер. – М.: Техносфера, 2012. – 1048 с.

References

1. Mezhdunarodnyy kodeks po ostoychivosti sudov v nepovrezhdennom sostoyanii 2008 goda (Kodeks ONS 2008) [International Code on Intact Stability, 2008 (IS Code 2008)]. M., IMO, 2008.
2. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Chast' IV. Ostoychivost' [Russian Maritime Register of Shipping. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part IV. Stability]. SPb., RMRS, 2020.
3. Voytkunskiy Ya.I. Spravochnik po teorii korablya. V 3 t. T. 2. Statika sudov. Kachka sudov [Handbook on ship theory. In 3 vols. Vol. 2. Ship statics. Ship rolling]. L., Sudostroyeniye, 1985, 440 s.
4. Spravochnik po sudovym izmereniyam [Handbook on ship measurements]. pod red. V.A. Semenova. M., Transport, 1990, 320 s.
5. Frayden Dzh. Sovremennyye datchiki. Spravochnik [Modern sensors. Handbook]. M., Tekhnosfera, 2005, 592 s.
6. NAVCOM DELTA 401. Sudovoy elektronnyy krenometr [Ship electronic inclinometer]. Available at: https://cirspb.ru/pdf/DELTA%20401.pdf.
7. Daniamant DanEI Electronic Inclinometer. Available at: https://www.marinelink.com/news/daniamant-danei-electronic-inclinometer-535776.
8. Sistema izmereniya osadki SIO-ITs11 [Draft measurement system SIO-ITs11]. Available at: https://www.korabel.ru/news/comments/inzhenerniy_tsentr_informatsionnih_i_upravlyayushchih_sistem_predlagaet_sistemu_izmereniya_osadki_sio-its11.html.
9. Inclinosensor. Inclining test system. Available at: https://www.sarc.nl/hardware/inclinosensor/

10. Ozsayan S., Taylan M. Another Blow on the Torn Down Wall, The Inclining Experiment. Brodogradnja, 2019, Vol. 70, No. 2, pp. 7–19. DOI: 10.21278/brod70207.
11. Radoš L., Turk A., Legović D. Comparison Between the Classical Method of Inclining Experiment with the Recent Alternative Methods. Journal of Maritime & Transportation Science, 2022, No. 4, pp. 23–43. DOI: 10.18048/2022.04.23.
12. Karolius K.B., Vassalos D. Tearing down the wall, The inclining experiment. Ocean Engineering, 2018, Vol. 148, pp. 442–475. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.11.037.
13. Gabil R., Davey T., Nixon E., Ingram D.M. Accuracy Analysis of the Measurement of Centre of Gravity and Moment of Inertia with a Swing. Applied Sciences, 2021, Vol. 11, No. 12, p. 5345. DOI: 10.3390/app11125345.
14. STM32F411xC STM32F411xE. Datasheet. Available at: https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f411ce.pdf
15. Smit S. Tsifrovaya obrabotka signalov. Prakticheskoye rukovodstvo [Digital signal processing. A practical guide]. M., Dodeka-XXI, 2012, 720 s.
16. Oppengeym A., Shafer R. Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]. M., Tekhnosfera, 2012, 1048 s.

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

Русановский Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры кораблестроения, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17, e-mail: s.rusanovskiy@narfu.ru

Sergei A. Rusanovskiy, Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of Shipbuiding, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: s.rusanovskiy@narfu.ru

Грамотин Роман Игоревич, Обучающийся по направлению подготовки «Управление в технических системах», Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17, e-mail: roma.gramotin@mail.ru

Roman I. Gramotin, Student in the field of study “Control in Technical Systems”, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: roma.gramotin@mail.ru

Музыка Михаил Михайлович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой судовой электроэнергетики и автоматики, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17, e-mail: m.muzyka@narfu.ru

Mikhail M. Muzyka, Ph.D. (Eng), Associate Professor, head of the Department of shipboard electric power and automation, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: m.muzyka@narfu.ru

Платоненков Сергей Владимирович, ст. преподаватель кафедры судовой электроэнергетики и автоматики, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17, e-mail: s.platonenkov@narfu.ru

Sergei V. Platonenkov, Senior Lecturer of the Department of electric power and automation, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: s.platonenkov@narfu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.07.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 21.07.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 24.07.2026.

Научная статья
УДК 531.391.1:532.5.011
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.032

Определение дифракционных сил второго порядка, обусловленных суммой частот, возникающих в условии бихроматического волнения на основании трехмерной потенциальной теории

Альбаев Д.А.[1] albaevdanil@gmail.com**, Семенова В.Ю.**[1] sem_viktoria@mail.ru
[1]Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье рассматривается определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, обусловленных суммой частот, действующих на судно в бесконечно-глубокой жидкости. Настоящая статья является продолжением цикла работ, посвященных определению нелинейных сил, обусловленных суммой и разностью частот, начатого авторами в 2025 году. Определение нелинейных дифракционных сил, обусловленных суммой частот основано на применении трехмерной потенциальной теории, метода интегральных уравнений и метода малого параметра. Выполнена апробация метода, а именно проверено выполнение условий, характерных для данных сил и выполнено сопоставление полученных расчетов с расчетами аналогичных сил, выполненных по двумерной теории. Проведенное сопоставление показало убедительное согласование результатов. Приводятся результаты расчетов нелинейных сил, для различных типов судов и различных комбинаций частот. Показано значительное увеличение нелинейных сил при сочетании частот $\omega_2 = 2.0$ с$^{-1}$, и изменении ω_1 от 0.1 до 2.0 с$^{-1}$. Показана возможность расчета нелинейных дифракционных сил и моментов при различных комбинациях курсовых углов бихроматического волнения. Приведенные результаты показали значительное увеличение всех шести составляющих дифракционных сил в случае, когда хотя бы один курсовой угол равен 90 градусам.
Ключевые слова: дифракция, бихроматическое волнение, нелинейные силы, сумма частот, метод малого параметра, функция Грина, трехмерная потенциальная теория
Для цитирования: Альбаев Д.А., Семенова В. Ю. Определение дифракционных сил второго порядка, обусловленных суммой частот, возникающих в условии бихроматического волнения на основании трехмерной потенциальной теории., Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 66—74. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.032

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.032

Determination of second-order diffraction forces due to the sum of frequencies arising on bichromatic waves based on three-dimensional potential theory

Danil A. Al'baev[1] albaevdanil@gmail.com**, Viktoriya Yu. Semenova**[1] sem_viktoria@mail.ru
[1]St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. This article examines the determination of second-order nonlinear diffraction forces due to the sum of frequencies acting on a ship in an infinitely deep fluid. This article continues a series of studies devoted to determining nonlinear forces due to the sum and difference of frequencies, begun by the authors in 2025. The determination of nonlinear diffraction forces due to the sum of frequencies is based on the application of three-dimensional potential theory, the method of integral equations, and the small parameter method. The method was tested, specifically, the conditions characteristic of these forces was verified, and the obtained calculations were compared with calculations of similar forces performed using two-dimensional theory. The comparison demonstrated convincing agreement between the results. The results of nonlinear force calculations are presented for various types of ships and various frequency combinations. A significant increase in nonlinear forces is demonstrated for the frequency combination $\omega_2 = 2.0$ s^{-1} and a change in ω_1 from 0.1 to 2.0 s^{-1}. The feasibility of calculating nonlinear diffraction forces and moments for various combinations of course angles in bichromatic waves is demonstrated. The presented results demonstrate a significant increase in all six components of diffraction forces when at least one course angle is equal to 90 degrees.
Key words: diffraction, bichromatic waves, nonlinear forces, sum of frequencies, small parameter methods, Green's function, three-dimensional potential theory
For citation: Danil A. Al'baev, Viktoriya Yu. Semenova, Determination of second-order diffraction forces due to the sum of frequencies arising on bichromatic waves based on three-dimensional potential theory. Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 66—74. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.032

Введение

Нелинейные силы второго порядка, возникающие при качке объекта на бихроматическом волнении состоят из двух категорий: сил, обусловленных суммой частот и сил, обусловленных разностью частот. При этом силы, обусловленные суммой частот, включают в себя нелинейные силы от удвоенного значения частоты, а силы, обусловленные разностью-постоянные нелинейные силы, иначе называемые силами волнового дрейфа.

© Альбаев Д.А., Семенова В.Ю. 2026

При использовании метода малого параметра для определения потенциалов второго порядка, каждую из этих нелинейных сил можно представить в виде суперпозиции составляющих четырех групп: 1 – силы, обусловленные отдельными видами колебаний; 2 – дифракционные силы; 3 – силы, обусловленные взаимодействием разных видов колебаний; 4 – силы, обусловленные взаимодействием вынужденного колебаниями волнения с набегающим и дифрагированным.

Нелинейные силы, обусловленные суммой и разностью частот первой группы -возникающие при отдельных видах качки, последовательно рассмотрены в работах авторов [5], [6], [8], [9] как в условиях бесконечно-глубокой жидкости, так и на мелководье.

Отдельного внимания заслуживают силы второй группы – силы, обусловленные взаимодействием набегающего и дифракционного волнения (дифракционные силы). Данные силы играют значительную роль в общем балансе сил.

Определение данных сил, обусловленных суммой частот было рассмотрено в работах Kim [11], Chen [12]. В этих работах используется «непрямой» метод определения нелинейных сил, основоположником которого является Molin [14]. Использование данного метода позволяет вовсе не определять потенциалы второго порядка, что исключает возможность определения в дальнейшем давления второго порядка, действующего в различных точках смоченной поверхности.

В работах Семеновой В.Ю. [4], Киав Тхура [2] дифракционные нелинейные силы от суммы частот были определены на основании двумерной потенциальной теории, в работе [4] на основании комбинации методов конформного отображения и гидродинамических особенностей, в работе [2] на основании метода интегральных уравнений. Несмотря на то, что в обеих работах потенциалы второго порядка определяются из решения соответствующих систем уравнений, определение нелинейных сил рассмотрено только для случая волнения лагом.

Целью настоящей работы является определение нелинейных дифракционных сил, обусловленных суммой частот, на основании метода, разработанного авторами в [4], [6], позволяющего как напрямую вычислять потенциалы второго порядка, так и учитывать произвольные курсовые углы.

Описание метода

Потенциал набегающего волнения в бесконечно-глубокой жидкости будет состоять из двух гармоник и иметь вид:

$$\varphi_0^{(1)} = -i\frac{g}{\omega_1}a_{\omega_1}e^{\nu_1 z + i\nu_1(x\cos\beta_1 + y\sin\beta_1)} - i\frac{g}{\omega_2}a_{\omega_2}e^{\nu_2 z + i\nu_2(x\cos\beta_2 + y\sin\beta_2)} = \Phi_{0_1}^{(1)} + \Phi_{0_2}^{(1)}. \quad (1)$$

Для решения задачи введем малый параметр, характеризующий относительную малость полувысоты волны к полуширине судна $\varepsilon_7 = \frac{a_w}{B/2}$.

Тогда потенциал скорости движения жидкости второго порядка будет иметь вид:

$$\Phi^{(2)} = \varepsilon_7^2(\Phi_{0+}^{(2)} + \Phi_{07_+}^{(2)} + \Phi_{77_+}^{(2)}). \quad (2)$$

Где $\Phi_{0+}^{(2)}$ – потенциал набегающего волнения второго порядка, обусловленный суммой частот. Для жидкости бесконечной глубины $\Phi_{0+}^{(2)} = 0$; $\Phi_{77_+}^{(2)}$ – потенциал дифрагированного волнения, $\Phi_{07_+}^{(2)}$ – потенциал, обусловленный взаимодействием набегающего и дифрагированного волнения.

Все потенциалы второго порядка должны удовлетворять уравнению Лапласа, принципу излучения, условию на глубине, а также граничным условиям на смоченной поверхности судна и свободной поверхности жидкости. При этом, граничные условия для потенциалов $\Phi_{77_+}^{(2)}$ и $\Phi_{07_+}^{(2)}$ можно объединить. Обозначим сумму этих потенциалов $\Phi_{7_+}^{(2)}$. Тогда, условие на смоченной поверхности судна для данного потенциала имеет вид:

$$\frac{\partial\Phi_{7+}^{(2)}}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

Граничное условие на свободной поверхности:

$$\frac{\partial\Phi_{7_+}^{(2)}}{\partial z} - \frac{(\omega_1+\omega_2)^2}{g}\Phi_{7_+}^{(2)} = Q_{F07} + Q_{F77} = = Q_{F7} = -\frac{i(\omega_1+\omega_2)}{g}\cdot\left[\nabla\left(\Phi_{0_1}^{(1)}\right)\cdot\nabla\left(\Phi_{7_2}^{(1)}\right) + \nabla\left(\Phi_{0_2}^{(1)}\right)\cdot\nabla\left(\Phi_{7_1}^{(1)}\right) + \nabla\left(\Phi_{7_1}^{(1)}\right)\cdot\nabla\left(\Phi_{7_2}^{(1)}\right)\right] + \frac{i\omega_1}{2g}\left(\Phi_{0_1}^{(1)} + \Phi_{7_1}^{(1)}\right)\left(\frac{\partial^2\Phi_{7_2}^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\omega_2^2}{g}\frac{\partial\Phi_{7_2}^{(1)}}{\partial z}\right) + \frac{i\omega_2}{2g}\left(\Phi_{0_2}^{(1)} + \Phi_{7_2}^{(1)}\right)\left(\frac{\partial^2\Phi_{7_1}^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\omega_1^2}{g}\frac{\partial\Phi_{7_1}^{(1)}}{\partial z}\right). \quad (4)$$

Потенциалы дифрагированного волнения первого порядка $\Phi_{7_i}^{(1)}$ определяются на основании решения линейной задачи [2].

Для определения потенциалов $\Phi_{7_+}^{(2)}$, обусловленных суммой частот, используется метод интегральных уравнений [1], согласно которому:

$$-\frac{1}{2}\Phi_{7+}^{(2)}(x,y,z) + \frac{1}{4\pi}\iint_{\Omega}\Phi_{7+}^{(2)}(\xi,\eta,\zeta)\frac{\partial G^{(2)}}{\partial n}d\Omega = = \frac{1}{4\pi}\iint_{S_F}Q_{F7}\,G^{(2)}dS_F \quad (5)$$

Функция Грина $G^{(2)}$ определяется по формуле для бесконечно-глубокой жидкости:

$$G^{(2)}(x,y,z,\xi,\eta,\zeta) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + 8\nu_1\int_0^{\infty}\frac{e^{k(z+\zeta)}}{k-\nu_1}J_0(kR)\,dk + i8\pi\nu_1 e^{\nu_1(z+\zeta)}J_0(\nu_1 R). \quad (6)$$

Здесь

$r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}$;

$r_1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+\zeta)^2}$;

$R = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$;

$\nu_1 = \frac{(\omega_1+\omega_2)^2}{g}$.

Для практической реализации решения, действительную часть функции Грина можно представить согласно Ньюману [15] и записать в виде:

$$Re\left(G^{(2)}\right) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + 4\nu F;$$
$$F = -\pi e^{-4\nu|z+\zeta|}\left(H_0(4\nu R) + Y_0(4\nu R)\right) - \quad (7)$$
$$-2\int_0 e^{t-4\nu|z+\zeta|} \cdot ((4\nu R)^2 + t^2)^{-1/2}.$$

Здесь H_0 и Y_0 функции Струве и Неймана соответственно.

Для функции Струве справедливы следующие равенства:

$$H_0(4\nu R) = -E_0(4\nu R);$$
$$-E_0(4\nu R) = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} \sin(-4\nu R \sin t)\, dt. \quad (8)$$

Интеграл в (8) легко определяется по формуле квадратур. Функции Неймана $Y_0(4\nu R)$ и Бесселя $J_0(4\nu R)$ определяются согласно выражениям:

- при $4\nu R \le 6$:

$$Y_0(4\nu R) = \frac{1}{\pi}\left[2J_0(4\nu R)\left(ln\frac{4\nu R}{2} + c\right) - \right.$$
$$\left. -2\sum_{k=1}^{\infty}\frac{(-1)k}{(k!)^2}\left(\frac{4\nu R}{2}\right)^{2k}\sum_{m=1}^{k}\frac{1}{m}\right]; \quad (9)$$
$$J_0(4\nu R) = \sum_{k=0}^{\infty}(-1)^k\frac{(4\nu R)^{2k}}{2^{2k}(k!)^2};$$

- при $4\nu R > 6$:

$$J_0(4\nu R) = \sqrt{\frac{2}{\pi 4\nu R}}\cos\left(4\nu R - \frac{\pi}{4}\right);$$
$$Y_0(4\nu R) = \sqrt{\frac{2}{\pi 4\nu R}}\sin\left(4\nu R - \frac{\pi}{4}\right). \quad (10)$$

Входящий в выражение (7) интеграл не имеет никаких особенностей и может быть определен согласно методу трапеций.

В работе авторов [7] было показано, что основные трудности решения дифракционной задачи второго порядка возникают при определении вторых производных, входящих в граничные условия на свободной поверхности. Благодаря использованию векторных преобразований и теоремы Гаусса [13] вычисления данных производных можно избежать вообще и в случае определения нелинейных дифракционных сил, обусловленных суммой частот.

Представим граничные условия на свободной поверхности, содержащие вторую производную, следующим образом:

$$\iint_{S_F} Q_{F7+}G^{(2)}dS_F = \iint_{S_F} Q_{F7_1}G^{(2)}dS_F +$$
$$+\iint_{S_F} Q_{F7_2}G^{(2)}dS_F;$$
$$Q_{F7_1} = -\frac{i(\omega_1+\omega_2)}{g}\left[\nabla\left(\Phi_{0_1}^{(1)}\right)\cdot\nabla\left(\Phi_{7_2}^{(1)}\right) + \right. \quad (11)$$
$$\left. +\nabla\left(\Phi_{0_2}^{(1)}\right)\cdot\nabla\left(\Phi_{7_1}^{(1)}\right) + \nabla\left(\Phi_{7_1}^{(1)}\right)\cdot\nabla\left(\Phi_{7_2}^{(1)}\right)\right] +$$
$$+\frac{i\omega_1}{2g}\left(\Phi_{0_1}^{(1)} + \Phi_{7_1}^{(1)}\right)\left(-\frac{\omega_2^2}{g}\frac{\partial\Phi_{7_2}^{(1)}}{\partial z}\right) +$$
$$+\frac{i\omega_2}{2g}\left(\Phi_{0_2}^{(1)} + \Phi_{7_2}^{(1)}\right)\left(-\frac{\omega_1^2}{g}\frac{\partial\Phi_{7_1}^{(1)}}{\partial z}\right);$$
$$Q_{F7_2} = \frac{i\omega_1}{2g}\left(\Phi_{0_1}^{(1)} + \Phi_{7_1}^{(1)}\right)\left(\frac{\partial^2\Phi_{7_2}^{(1)}}{\partial z^2}\right) +$$
$$+\frac{i\omega_2}{2g}\left(\Phi_{0_2}^{(1)} + \Phi_{7_2}^{(1)}\right)\left(\frac{\partial^2\Phi_{7_1}^{(1)}}{\partial z^2}\right).$$

Согласно [12], можно получить:

$$\iint_{S_F}(\Phi_{0_i}^{(1)} + \Phi_{7_i}^{(1)})\frac{\partial^2\Phi_{7_j}^{(1)}}{\partial z^2}G^{(2)}dS_F =$$
$$= -\int_{WL+PC}(\Phi_{0_i}^{(1)} + \Phi_{7_i}^{(1)})\left(\nabla\Phi_{7_j}^{(1)}\cdot n\right)G^{(2)}dl +$$
$$+\iint_{S_F}\left(\nabla(\Phi_{0_i}^{(1)} + \Phi_{7_i}^{(1)})\cdot\nabla\Phi_{7_j}^{(1)}\right)G^{(2)}dS_F + \quad (12)$$
$$+\iint_{S_F}(\Phi_{0_i}^{(1)} + \Phi_{7_i}^{(1)})\left(\nabla\Phi_{7j}^{(1)}\cdot\nabla G^{(2)}\right)dS_F.$$

Здесь $i = \{1,2\}$, $j = \{1,2\}$.

В выражении (12) $\iint_{WL+PC}$ берется по контуру ватерлинии судна и по контуру, ограничивающему свободную поверхность жидкости на достаточно большом удалении от судна. При этом нормали к поверхности, ограниченной ватерлинией и контуром PC должны быть внешними.

Давление второго порядка, вызванное дифракцией волнения, имеет вид:

$$p_{7_+}^{(2)} = -\rho\frac{\partial\Phi_{7+}^{(2)}}{\partial t} -$$
$$-\frac{1}{2}\rho\left[\nabla\left(\Phi_{0_1}^{(1)} + \Phi_{7_1}^{(1)}\right)\cdot\nabla\left(\Phi_{0_2}^{(1)} + \Phi_{7_2}^{(1)}\right)\right]. \quad (13)$$

Нелинейные дифракционные силы и моменты, обусловленные суммой частот, определяются путем интегрирования соответствующего давления по смоченной поверхности по следующим формулам:

$$F_{7+}^{(2)} = -\int_{\Omega} p_{7_+}^{(2)}\,\bar{n}d\Omega - \frac{1}{2}\int_{WL} z_W^2\bar{n}dl;$$
$$M_{7+}^{(2)} = -\int_{\Omega} p_{7_+}^{(2)}\,(\bar{r}\times\bar{n})d\Omega - \quad (14)$$
$$-\frac{1}{2}\int_{WL} z_W^2(\bar{r}\times\bar{n})dl;$$
$$z_W^2 = \frac{2}{g^2}\left[\frac{\partial\left(\Phi_{0_1}^{(1)} + \Phi_{7_1}^{(1)}\right)}{\partial t}\frac{\partial\left(\Phi_{0_2}^{(1)} + \Phi_{7_2}^{(1)}\right)}{\partial t}\right]\Bigg|_{\zeta=0}$$

Анализ результатов

Расчеты нелинейных дифракционных сил и моментов, обусловленных суммой частот проводились для четырех различных типов судов: ледокол «Норильск» ($L = 160$ м, $B = 23.1$ м, $T = 8.5$ м, $\delta = 0.68$, $\alpha = 0.83$, $h_0 = 1.13$ м), лесовоз «Павлин Виноградов» ($L = 124.9$ м, $B = 18.8$ м, $T = 7.4$ м, $\delta = 0.65$, $\alpha = 0.77$, $h_0 = 1.97$ м), балкер «Капитан Панфилов » ($L = 134$ м, $B = 20{,}6$ м, $T = 9{,}4$ м, $\delta = 0.78$, $\alpha = 0.88$, $h_0 = 1.45$ м), сухогруз «Новгород» ($L = 138$ м, $B = 20.6$ м, $T = 9$ м, $\delta = 0.681$, $\alpha = 0.788$, $h_0 = 1.7$ м).

При расчете любой категории нелинейных сил, обусловленных суммой частот в первую очередь должно проверяться условие симметрии. Даже незначительные погрешности в программном коде способны привести к невыполнению следующих условий:

$$F_{Y_+}^{(2)}(\omega_1,\omega_2) = F_{Y_+}^{(2)}(\omega_2,\omega_1);$$
$$F_{Z_+}^{(2)}(\omega_1,\omega_2) = F_{Z_+}^{(2)}(\omega_2,\omega_1); \quad (15)$$
$$M_{X_+}^{(2)}(\omega_1,\omega_2) = M_{X_+}^{(2)}(\omega_2,\omega_1).$$

Проверка выполнения данных условий для дифракционных сил проводилась для всех судов , для сочетаний частот, когда ω_1 последовательно изменяется от 0.1 до 1 и ω_2 в свою очередь изменяется от 0.1 до 1. Характерные результаты представлены на рисунки 1–4 для разных судов. Из приведенных на графиках результатов видно, что условия симметрии полностью выполняются для всех составляющих дифракционных нелинейных сил и моментов. Приведенные диаграммы изменения нелинейных дифракционных горизонтальных, вертикальных сил и моментов в зависимости от частот ω_1 и ω_2 представляют собой абсолютно симметричные изображения относительно главной диагонали.

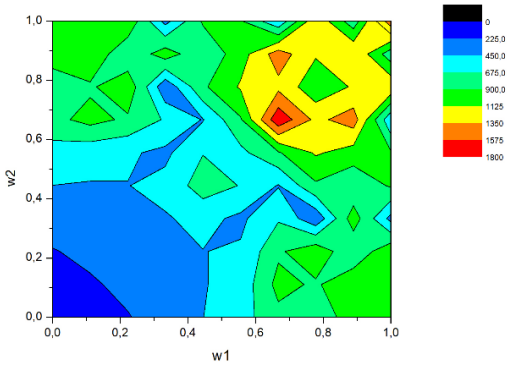


Рис. 1. Проверка условия (15) для горизонтальной дифракционной силы $F_{Y_{7+}}^{(2)}$ для сухогруза «Новгород»

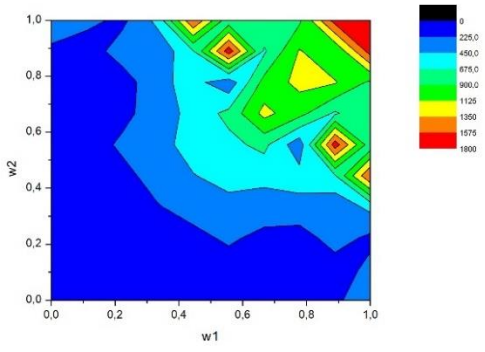


Рис. 2. Проверка условия (15) для вертикальной дифракционной силы $F_{Z_{7+}}^{(2)}$лесовоза «Павлин Виноградов»

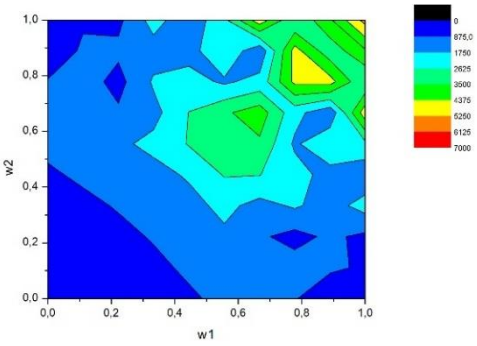


Рис. 3. Проверка условия (15) для момента $M_{X_{7+}}^{(2)}$ судна «Капитан Панфилов»

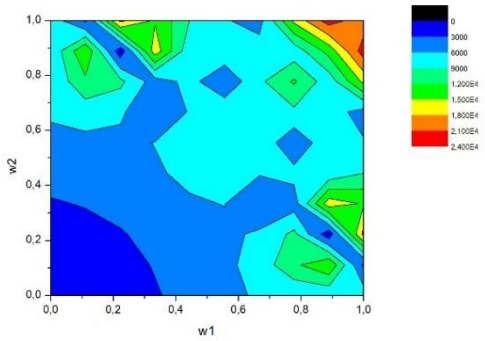


Рис. 4. Проверка условия (15) для момента $M_{Z_{7+}}^{(2)}$ судна «Норильск»

Вторая по значимости проверка заключается в выполнении равенств значений всех нелинейных сил и моментов при одинаковых частотах ω_1 и ω_2 удвоенным значениям соответствующих нелинейных дифракционных сил и моментов, обусловленных частотой $2\omega_2$:

$$F_{Y_+}^{(2)}(\omega_1+\omega_2) = 2F_{Y_+}^{(2)}(2\omega_2);$$
$$F_{Z_+}^{(2)}(\omega_1+\omega_2) = 2F_{Z_+}^{(2)}(2\omega_2); \quad (16)$$
$$M_{X_+}^{(2)}(\omega_1+\omega_2) = 2M_{X_+}^{(2)}(2\omega_2).$$

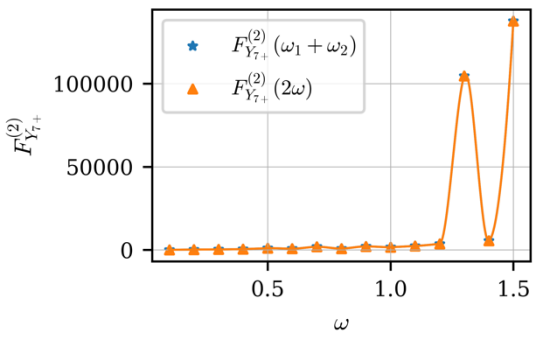


Рис. 5. Проверка условия (21) для горизонтальной силы $F_{Y_{7+}}^{(2)}$ судна «Капитан Панфилов»

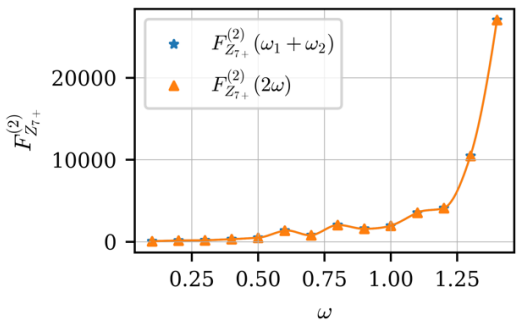


Рис. 6. Проверка условия (21) для вертикальной силы $F^{(2)}_{Z_{7+}}$ судна «Норильск»

В целях апробации разработанной программы полученные значения нелинейных дифракционных сил и моментов, обусловленных суммой частот сравнивались с удвоенными значениями нелинейных дифракционных горизонтальных и вертикальных сил и моментов $2F^{(2)}_Y(\omega)$, $2F^{(2)}_Z(\omega)$, $2M^{(2)}_X(\omega)$ полученными из [3]. Некоторые результаты приведены на рисунках 5 – 6.

Из приведенных для различных судов результатов видно, что условия (16) полностью выполняются.

На рисунках 7 – 11 приведены результаты расчетов нелинейных дифракционных сил и моментов в зависимости от различных комбинаций значений частот при расположении судном лагом.

Расчеты нелинейных сил и моментов проводились для следующих вариантов сочетаний частот бихроматического волнения ω_1 и ω_2:

1. $\omega_2 = 1.0$ с$^{-1}$, ω_1 изменялось от 0.1 до 1.0 с$^{-1}$.
2. $\omega_2 = 1.5$ с$^{-1}$, ω_1 изменялось от 0.1 до 1.5 с$^{-1}$.
3. $\omega_2 = 2.0$ с$^{-1}$, ω_1 изменялось от 0.1 до 2.0 с$^{-1}$.

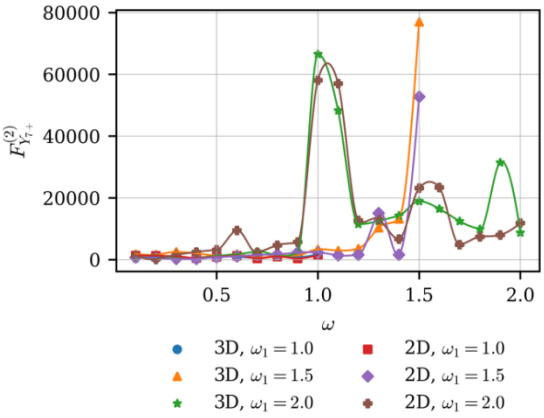


Рис. 7. Нелинейные дифракционные горизонтальные силы $F^{(2)}_{Y_{7+}}$, обусловленные суммой частот в зависимости от различных сочетаний частот для судна «Новгород»

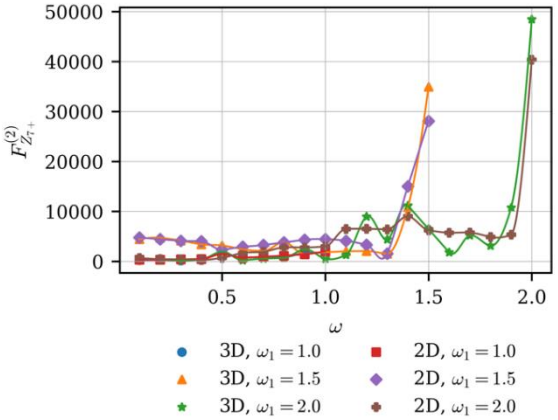


Рис. 8. Нелинейные дифракционные вертикальные силы $F^{(2)}_{Z_{7+}}$, обусловленные суммой частот в зависимости от различных сочетаний частот для судна «Павлин Виноградов»

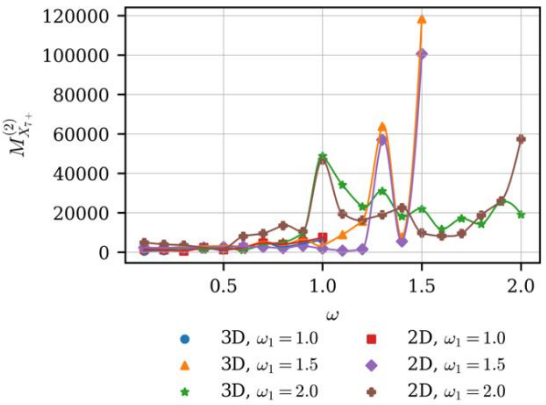


Рис. 9. Нелинейные моменты $M^{(2)}_{X_{7+}}$, обусловленные суммой частот в зависимости от различных сочетаний частот для судна «Капитан Панфилов»

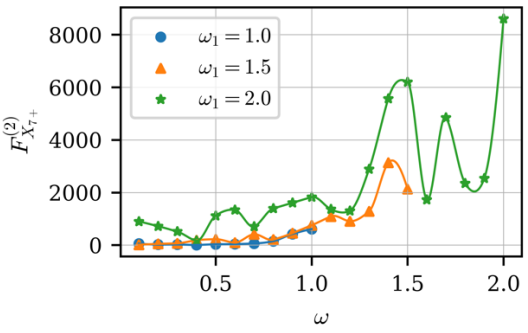


Рис. 10. Нелинейные дифракционные горизонтальные силы $F^{(2)}_{X_{7+}}$, обусловленные суммой частот в зависимости от различных сочетаний частот для судна «Норильск»

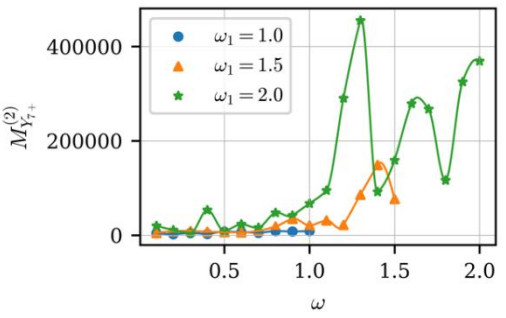


Рис. 11. Нелинейные дифракционные моменты $M^{(2)}_{Y_{7+}}$, обусловленные суммой частот в зависимости от различных сочетаний частот для судна «Новгород»

Сопоставление результатов расчетов нелинейных горизонтальных, вертикальных дифракционных сил и моментов $M^{(2)}_{X_{7+}}$ при расположении судна лагом с соответствующими расчетами, выполненными по двумерной теории, показало их хорошее согласование между собой при любых комбинациях частот (рис. 7 – 9).

Анализ полученных результатов показал, что все составляющие нелинейных дифракционных сил и моментов возрастают при увеличении частоты ω_1 . Наибольшие значения данные силы имеют место при увеличении второй частоты ω_2 до 2.0 (рис. 7 – 11). Результаты, полученные для всех четырех судов, показали, что при третьей рассмотренной комбинации частот, все составляющие дифракционных сил и моментов имеют ярко выраженный «пик» в диапазоне частот $1 < \omega_1 < 1.5$. Точно такой же пик имеет место и при расчетах по двумерной теории (рис. 7 – 9). Аналогичное явление имеет место и при второй комбинации частот.

В работе также проводились расчеты при различных сочетаниях курсовых углов бихроматического волнения $\boldsymbol{\beta_1}$ и $\boldsymbol{\beta_2}$. Выполнена проверка условия симметрии. При одинаковых частотах $\boldsymbol{\omega_1}$ и $\boldsymbol{\omega_2}$ выполнены расчеты всех сотавляющих дифракционных сил при $\boldsymbol{\beta_1 = 60}$, $\boldsymbol{\beta_2 = 135}$ и наоборот $\boldsymbol{\beta_1 = 135, \beta_2 = 60}$. Результаты проверки приведены на рисунке 12 для горизонтальной и вертикальной дифракционных сил, действующих на судно «Павлин Виноградов». Из приведенных результатов видно, что условие симметрии безупречно выполняется.

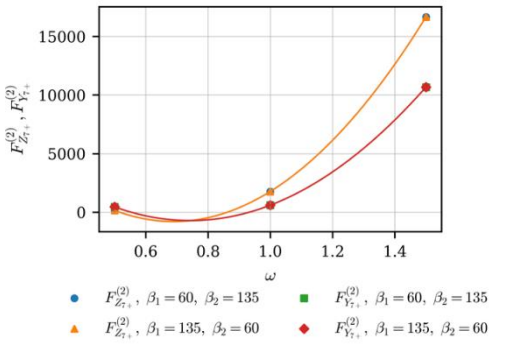


Рис. 12. Проверка условия симметрии для курсовых углов для судна «Павлин Виноградов»

На рисунках 13 – 15 приведены результаты расчетов нелинейных дифракционных сил и моментов, при $\boldsymbol{\beta_1 = \beta_2 = 60, \beta_1 = \beta_2 = 90}$ и $\boldsymbol{\beta_1 = \beta_2 = 135}$ для разных судов. При этом $\boldsymbol{\omega_2 = 1}$, $\boldsymbol{\omega_1}$ изменялась от 0.1 до 1.0.

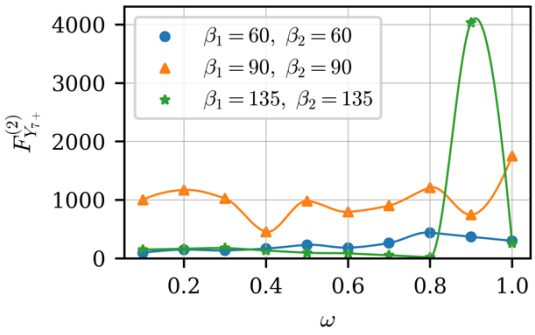


Рис. 13. Нелинейные дифракционные горизонтальные силы $F^{(2)}_{Y_{7+}}$, обусловленные суммой частот в зависимости от разных сочетаний курсовых углов для судна «Павлин Виноградов»

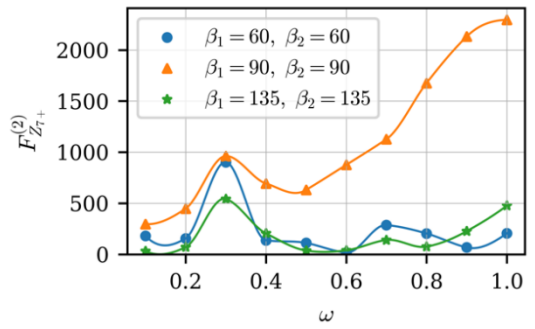


Рис. 14. Нелинейные дифракционные вертикальные силы $F^{(2)}_{Z_{7+}}$, обусловленные суммой частот в зависимости от разных сочетаний курсовых углов для судна «Капитан Панфилов»

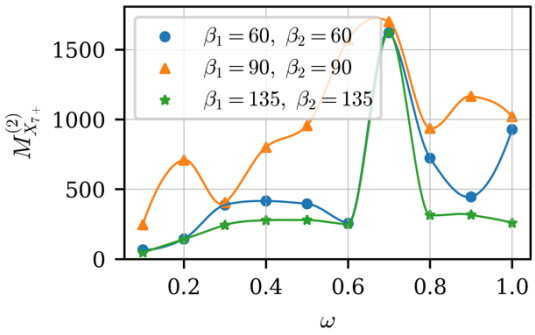


Рис. 15. Нелинейные дифракционные моменты $M^{(2)}_{X_{7+}}$, обусловленные суммой частот в зависимости от разных сочетаний курсовых углов для судна «Норильск»

Из приведенных на рисунках результатов видно, что наибольшие значения нелинейные дифракционные силы и моменты имеют, когда $\boldsymbol{\beta_1 = \beta_2 = 90}$.

При этом имеет место многократное увеличение амплитудных значений данных сил по сравнению с косыми углами. Так, при сочетании частот $\omega_1 = 0.6$ и $\omega_2 = 1$ дифракционная вертикальная сила, действующая на судно «Капитан Панфилов» при $\beta_1 = \beta_2 = 90$ в 23 раза больше, чем при $\beta_1 = \beta_2 = 135$ (рис.14). Нелинейный дифракционный момент $M^{(2)}_{X_{7+}}$, действующий на судно «Норильск» при таком же сочетании частот и равенстве обоих углов 90 градусам в 6 раз больше аналогичного момента при равенстве углов 60 градусам (рис. 15).

На рисунках 16 – 18 приведены результаты расчетов нелинейных сил и моментов при комбинациях следующих значений курсовых углов: $\beta_1 = 90, \beta\_2 = 60$; $\beta_1 = \beta_2 = 90$; $\beta_1 = 90\,, \beta_2 = 135$.

Анализ полученных результатов показал, что наибольшие значения дифракционных сил имеют место при равенстве обоих курсовых углов 90 градусам. При этом также имеет место многократное увеличение данных сил по сравнению с другими сочетаниями курсовых углов бихроматического волнения. Нелинейные силы и моменты при сочетании $\boldsymbol{\beta_1 = 90, \beta_2 = 60}$ и $\boldsymbol{\beta_1 = 90, \beta_2 = 135}$ на большем диапазоне частот соизмеримы между собой (рис. 16 – 18).

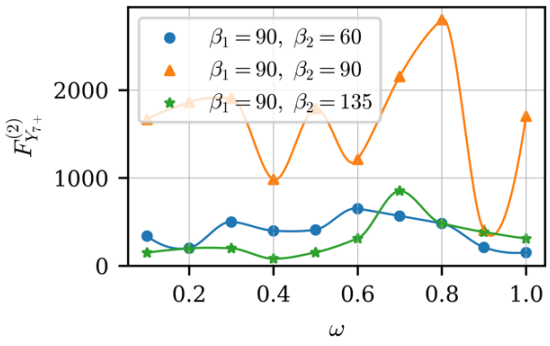


Рис. 16. Нелинейные дифракционные горизонтальные силы $F^{(2)}_{Y_{7+}}$, обусловленные суммой частот в зависимости от разных сочетаний курсовых углов для судна «Норильск»

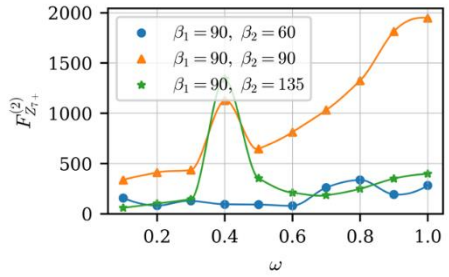


Рис. 17. Нелинейные дифракционные вертикальные силы $F^{(2)}_{Z_{7+}}$, обусловленные суммой частот в зависимости от разных сочетаний курсовых углов для судна «Новгород»

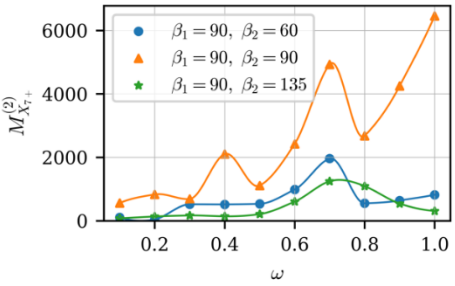


Рис. 18. Нелинейные дифракционные моменты $\boldsymbol{M^{(2)}_{X_{7+}}}$, обусловленные суммой частот в зависимости от разных сочетаний курсовых углов для судна «Капитан Панфилов»

Заключение

В настоящей статье изложен метод, позволяющий определять нелинейные дифракционные силы второго порядка, обусловленные суммой частот и действующие на судно в бесконечно-глубокой жидкости. Метод разработан на основании трехмерной потенциальной теории, методов малого параметра и интегральных уравнений. Выполнена апробация метода. Разработанный метод позволяет рассчитывать нелинейные дифракционные силы, при различных сочетаниях частот и курсовых углов. И действующие на любые объекты, как обычные суда, так и объекты океанотехники.

В дальнейшем, предполагается использовать разработанный для расчета нелинейных дифракционных сил, обусловленных разностью частот, а также для расчета данных сил в условиях мелководья.

Литература

1. Альбаев Д.А. (2024) Разработка метода расчета нелинейных сил, возникающих при качке судна на основании трехмерной потенциальной теории. Диссертация на соискание ученной степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург.
2. Киав Тхура (2019) Разработка метода расчета нелинейных сил второго порядка, обусловленных суммой и разностью частот, возникающих при качке судна на волнении. Диссертация на соискание ученной степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург.
3. Семенова В.Ю. (2005) Разработка метода расчета нелинейной качки судов. Дисс. на соискание уч. степени д.т.н. СПбГМТУ.
4. Семенова В.Ю. Расчет нелинейных сил второго порядка, обусловленных суммой и разностью частот и возникающих при дифракции нерегулярного волнения от шпангоутного контура Журнал Морской Вестник N3 (6),2007

5. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Исследование влияния мелководья на нелинейные силы второго порядка, обусловленные разностью частот, возникающие при поперечных видах качки судов на бихроматическом волнении. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 2, часть 1. С. 28–37. DOI: 10.37220/MIT.2026.72.2.003.
6. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Исследование влияния мелководья на нелинейные силы второго порядка, обусловленные суммой частот, возникающие при поперечных видах качки судов на бихроматическом волнении. Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4-1(70). С. 69–77. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.030.
7. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на судно, на основании трехмерной теории. Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-3(52). С. 20–27. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.030
8. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение нелинейных сил второго порядка, обусловленных суммой частот, возникающих при поперечно-горизонтальных, вертикальных и бортовых колебаниях судна на основании трехмерной потенциальной теории. Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 2-1(68). С. 65–73. DOI: 10.37220/MIT.2025.68.2.006.
9. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение нелинейных сил второго порядка, обусловленных разностью частот, возникающих при поперечно-горизонтальных, вертикальных и бортовых колебаниях судна на основании трехмерной потенциальной теории. Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 3-1(69). С. 42–50. DOI: 10.37220/MIT.2025.69.3.018.
10. Chen X.B., Rezende F, Renaud M. Second-order wave loads on a LNG carrier in multidirectional wave. Bulletin Technique-Bureau Veritas 2008, p.35-42.
11. Kim M.H. Second-order sum-frequency wave loads on large-volume structures. Applied Ocean Research, 1991, Vol.13, No.6. pp.287-296.
12. Kim Y., Computation of higher-order hydrodynamic forces on ships and offshore structures in waves. Diss. Massachusetts Institute of Technology,1999.
13. Lee C. H. Wamit. (1995) Theory manual //Report N 95-2. Massachusetts institute of technology Department of Ocean Engineering, Cambridge.
14. Molin B. Second Order Diffraction Loads upon Three-Dimensional Bodies // Applied Ocean Research. – 1979. – vol. 1. – No. 4. – pp. 197-202.
15. Newman, J.N. Algorithms for the free-surface Green’s function. Journal of engineering mathematics, 1985, pp. 57-67.

References

1. Al'baev D.A. (2024) Razrabotka metoda rascheta nelineinykh sil, voznikayushchikh pri kachke sudna na osnovanii trekhmernoi potentsial'noi teorii [Development of a method for calculating nonlinear forces arising during ship motions based on three-dimensional potential theory]. Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [PhD dissertation in Engineering]. Saint Petersburg.
2. Kiav Tkhura (2019) Razrabotka metoda rascheta nelineinykh sil vtorogo poryadka, obuslovlennykh summoi i raznost'yu chastot, voznikayushchikh pri kachke sudna na volnenii [Development of a method for calculating second-order nonlinear forces caused by the sum- and difference-frequency components arising during ship motions in waves]. Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [PhD dissertation in Engineering]. Saint Petersburg.
3. Semenova V.Yu. (2005) Razrabotka metoda rascheta nelineinoi kachki sudov [Development of a method for calculating nonlinear ship motions]. Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Doctor of Engineering dissertation]. Saint Petersburg State Marine Technical University.
4. Semenova V.Yu. Raschet nelineinykh sil vtorogo poryadka, obuslovlennykh summoi i raznost'yu chastot i voznikayushchikh pri difraktsii neregulyarnogo volneniya ot shpangoutnogo kontura [Calculation of second-order nonlinear forces caused by the sum- and difference-frequency components arising from diffraction of irregular waves by a ship frame contour]. Morskoi Vestnik [Marine Bulletin], No. 3(6), 2007.
5. Semenova V.Yu., Al’baev D.A. Issledovanie vliyaniya melkovod’ya na nelineinye sily vtorogo poryadka, obuslovlennye raznost’yu chastot, voznikayushchie pri poperechnykh vidakh kachki sudov na bikhromaticheskom volnenii [Investigation of the influence of shallow water on second-order nonlinear difference-frequency forces arising during transverse ship motions in bichromatic waves]. Morskie intellektual’nye tekhnologii [Marine Intelligent Technologies]. 2026. No. 2, Part 1. Pp. 28–37. DOI: 10.37220/MIT.2026.72.2.003.
6. Semenova V.Yu., Al’baev D.A. Issledovanie vliyaniya melkovod’ya na nelineinye sily vtorogo poryadka, obuslovlennye summoi chastot, voznikayushchie pri poperechnykh vidakh kachki sudov na bikhromaticheskom volnenii [Investigation of the influence of shallow water on second-order nonlinear sum-frequency forces arising during transverse ship motions in bichromatic waves]. Morskie intellektual’nye tekhnologii [Marine Intelligent Technologies]. 2025. No. 4-1(70). Pp. 69–77. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.030.
7. Semenova V.Yu., Al’baev D.A. Opredelenie nelineinykh difraktsionnykh sil vtorogo poryadka, deistvuyushchikh na sudno, na osnovanii trekhmernoi teorii [Determination of second-order nonlinear diffraction forces acting on a ship based on three-dimensional potential theory]. Morskie intellektual’nye tekhnologii [Marine Intelligent Technologies]. 2021. No. 2-3(52). Pp. 20–27. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.030.
8. Semenova V.Yu., Al’baev D.A. Opredelenie nelineinykh sil vtorogo poryadka, obuslovlennykh summoi chastot, voznikayushchikh pri poperechno-gorizontal’nykh, vertikal’nykh i bortovykh kolebaniyakh sudna na osnovanii trekhmernoi potentsial’noi teorii [Determination of second-order nonlinear sum-frequency forces arising during

sway, heave and roll motions of a ship based on three-dimensional potential theory]. Morskie intellektual'nye tekhnologii [Marine Intelligent Technologies]. 2025. No. 2-1(68). Pp. 65–73. DOI: 10.37220/MIT.2025.68.2.006.
9. Semenova V.Yu., Al'baev D.A. Opredelenie nelineinykh sil vtorogo poryadka, obuslovlennykh raznost'yu chastot, voznikayushchikh pri poperechno-gorizontal'nykh, vertikal'nykh i bortovykh kolebaniyakh sudna na osnovanii trekhmernoi potentsial'noi teorii [Determination of second-order nonlinear difference-frequency forces arising during sway, heave and roll motions of a ship based on three-dimensional potential theory]. Morskie intellektual'nye tekhnologii [Marine Intelligent Technologies]. 2025. No. 3-1(69). Pp. 42–50. DOI: 10.37220/MIT.2025.69.3.018.
10. Chen X.B., Rezende F., Renaud M. Second-order wave loads on an LNG carrier in multidirectional waves. Bulletin Technique - Bureau Veritas. 2008. Pp. 35-42.
11. Kim M.H. Second-order sum-frequency wave loads on large-volume structures. Applied Ocean Research. 1991. Vol. 13. No. 6. Pp. 287-296.
12. Kim Y. Computation of higher-order hydrodynamic forces on ships and offshore structures in waves. PhD Dissertation. Massachusetts Institute of Technology, 1999.
13. Lee C.H. WAMIT Theory Manual. Report No. 95-2. Massachusetts Institute of Technology, Department of Ocean Engineering, Cambridge, 1995.
14. Molin B. Second Order Diffraction Loads upon Three-Dimensional Bodies. Applied Ocean Research. 1979. Vol. 1. No. 4. Pp. 197-202.
15. Newman, J.N. Algorithms for the free-surface Green's function. Journal of engineering mathematics, 1985, pp. 57-67.

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

Альбаев Данил Айдарович, кандидат технических наук, доцент кафедры теории корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: albaevdanil@gmail.com

Семенова Виктория Юрьевна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой теории корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: sem_viktoria@mail.ru

Danil A. Al'baev, PhD (Eng), associate professor of department of theory of the ship, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: albaevdanil@gmail.com

Viktoriya Yu. Semenova, Dr. Sci. (Eng.), professor, the head of department of theory of the ship, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: sem_viktoria@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.07.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 25.07.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 29.07.2026.

Научная статья
УДК 531.391.1:532.5.011
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.033

Численное исследование гидродинамики крупнотоннажных катамаранов для внутренних водных путей

Чебан Е.Ю.[1] egor.cheban.2@gmail.com, **Кожевников А.И.**[1] nkolonget@ro.ru,
Никущенко Д. В.[2] Ndmitry@list.ru, **Ермаков С.А.**[1,3] stas.ermakov8@gmail.com
[1]Волжский государственный университет водного транспорта, [2]Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, [3]Институт прикладной физики Российской академии наук

Аннотация. Использование крупнотоннажных речных катамаранных паромов может существенно повысить эффективность внутреннего водного транспорта за счет увеличения скорости судов. Однако, повышение скорости приводит к увеличению высот корабельных волн, что отрицательно сказывается на гидродинамических характеристиках самого судна, на экологическом состоянии водных объектов, гидротехнических сооружениях. В настоящей работе представлены результаты исследования гидродинамики катамаранов численными методами для Fr_L=0,181-0,353, который характеризуется большой амплитудой колебаний коэффициентов сопротивления для катамаранов с L=112, L=132 и L=152 м, при ширине одного корпуса 9 и 10 метров с относительным клиренсом от 0,3 до 0,56 для плоского, симметричного и несимметричного (0,35/0,65) внутреннего борта. Использовался программный комплекс NUMECA/FineMarineTM. Результаты позволяют утверждать, что для речных катамаранов при длинах от 112 до 152 м в диапазоне Fr_L=0,181-0,353 существуют комбинации формы внутреннего борта и длины судна, горизонтального клиренса и скорости движения, при которых будет наблюдаться уменьшение коэффициента сопротивления, обусловленные процессами трансформации волн (интерференции, дифракции, отражения и преломления) в междукорпусном пространстве катамарана. Локальные минимумы сопротивления в окрестности значений около Fr_L=0,24 и Fr_L=0,27 для симметричного и несимметричного корпусов отвечают соответственно двум и трем значениям длин поперечных (“кормовых”) волн укладывающихся на длине корпусов. Волны, возбуждаемые источником вблизи носа судна, частично интерферируют с волнами, возбуждаемые кормовой частью судна, учитывая, что кормовой источник находится в противофазе с носовым.
Ключевые слова: крупнотоннажный речной катамаран, внутренние водные пути, число Фруда, высота волны, численное моделирование, остаточное сопротивление, NUMECA/FineMarine™, интерференция волн.
Благодарности: в данной работе использованы научные идеи профессора, д.т.н., Алферьева М.Я. (1901-1983).
Для цитирования: Чебан Е.Ю., Кожевников А.И., Никущенко Д.В., Ермаков С.А. Численное исследование гидродинамики крупнотоннажных катамаранов для внутренних водных путей. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 75—85. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.033

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.033

Numerical study of the Hydrodynamics of Large-Tonnage Catamarans for Inland Waterways

Egor Yu. Cheban[1] egor.cheban.2@gmail.com, **Artur I. Kozhevnikov**[1] nkolonget@ro.ru,
Dmitry. V. Nikushchenko[2] Ndmitry@list.ru, **Stanislav A. Ermakov**[1,3] stas.ermakov8@gmail.com
[1]Volga State University of Water Transport, Russian Federation, [2]St. Petersburg state marine technical university Russian Federation, [3]Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences

Abstract. The use of large-tonnage river catamaran ferries can significantly enhance the efficiency of inland waterway transport by increasing vessel speeds. However, higher speeds lead to increased ship-generated wave heights, which adversely affect the hydrodynamic performance of the vessel itself, the ecological state of water bodies, and hydraulic structures. This paper presents the results of a numerical study of catamaran hydrodynamics for length-based Froude numbers ranging from 0.181 to 0.353. This range is characterized by large-amplitude fluctuations in the resistance coefficients for catamarans with lengths of 112, 132, and 152 m, a demihull beam of 9 and 10 m, and a relative demihull clearance (gap ratio) from 0.3 to 0.56. The configurations analyzed feature flat, symmetric, and asymmetric (0.35/0.65) inner hull sides. The simulations were performed using the NUMECA/FineMarine™ software package. The results demonstrate that for river catamarans with lengths from 112 to 152 m in the Fr_L=0.181–0.353, there exist specific combinations of inner hull shape, vessel length, horizontal clearance, and speed that yield a reduction in the resistance coefficient. This reduction is driven by wave transformation processes (interference, diffraction, reflection, and refraction) within the inter-hull space of the catamaran. Local resistance minimum in the vicinity of Fr_L≈0.24and Fr_L≈0.27 for symmetric and asymmetric demihulls correspond, respectively, to two and three transverse (stern) wave lengths fitting along the hull length. The waves generated by a wave-making source near the bow partially interfere with the waves generated by the stern, given that the stern wave source is in anti-phase with the bow source.
Keywords: CFD, large cargo catamaran, inland waterways, towing test experiment, Froude number, wave height, wave resistance, catamaran’s hull interaction

© Чебан Е.Ю., Кожевников А.И., Никущенко Д.В., Ермаков С.А. 2026

Acknowledgments: The present study incorporates the scientific concepts advanced by Professor M. Ya. Alferiev, Dr. Sci. (Eng), (1901–1983).
For citation: Egor Yu. Cheban, Artur I. Kozhevnikov, Dmitry. V. Nikushchenko, Stanislav A. Ermakov Numerical study of the Hydrodynamics of Large-Tonnage Catamarans for Inland Waterways. Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 75—85. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.033

Введение

Повышение эффективности и конкурентноспособности внутреннего водного транспорта воможно за счет повышения скорости судов и перевода части грузопотоков с автомобильноо транспорта [1 - 4]. Кроме того, в ряде регионов с ограниченной по времени навигацией, проблема повышения скорости перевозок еще более актуальна. Если проблема повышения скорости пассажирских перевозок может быть решена с помощью судов на подводных крылях или воздушной подушке, то для транпортировки колесной и гусеничной техники, контейнеров, специального оборудования, строительных и прочих грузов требуются суда новых типов, со скоростями движения, превышающими существующие. Кроме того, на внутренних водных путях России находится большое количество участков с ограниченными глубинами, которые требуют использования судов с уменьшенными осадками. Предполагается, что судном, которое может обеспечить скорости движения около 30 км/ч может стать водоизмешающий катамаран, что поволит избежать требований, предъявляемым к скоростным судам в части движения в темное время суток и в неблагоприятных погодных условиях.

В 60-80 гг. двадцатого века на ВВП эксплуатировались грузовые речные катамараны проектов Р-19 («Братья Игнатовы») и 829 (Кт-619) г/п 1000т. и 600т., построенные по результатам исследований, выполненных М.Я. Алферьевым и показавшие высокую эффективность использования подобных судов [5,6]. В то же время скорости их движения не достигали 30 км/ч и составляли 24,5 км/ч у Кт-619 и 27 км/ч у Р-19.



Рис. 1. Речной грузовой катамаран проекта 829 (КТ-619).

С целью повышения грузоподъемности речных катамаранов в 60-е годы в ГИИВТе под руководством М.Я, Алферьева и Г.С. Мадорского выполнялась предэскизная проработка плотовозов катамаранного типа длиной 118 и 130 м и грузоподъемностью около 5000 тонн (рис. 3), включавшая модельные испытания в опытовом бассейне. В 2010-2020-е годы ВГУВТ совместно с КБ «Вымпел» предложили систему мультимодальных перевозок для ВВП с использованием большегрузного катамаранного парома «Транзит» [4].



Рис. 2. Речной грузовой катамаран проекта Р-19.

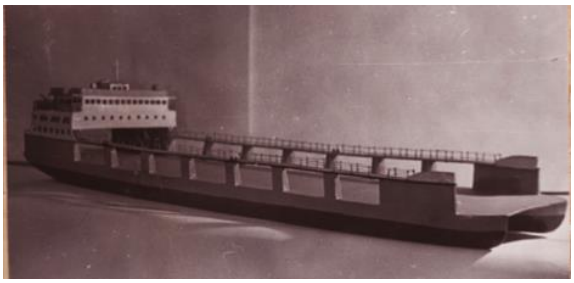


Рис. 3. Катамаранный плотовоз Г.С. Мадорского.



Рис. 4. Перспективный катамаранный паром «Транзит».

В настоящее время флот катамаранов на ВВП продолжает расти за счет относительно небольших пассажирских и прогулочных судов, в том числе скоростных и электрических, поэтому исследованию гидродинамики катамаранов посвящено достаточно большое число работ, в первую очередь в области чисел Fr_L>0,3. Для большегрузных катамаранов внутреннего плавания интерес представляет доволновой или докритический режим [5] в диапазоне чисел Фруда от 0,2 до 0,3. Этот диапазон характеризуется существенными перепадами сопротивления даже при небольшом изменении чисел Фруда [7,8], что по всей видимости обусловлено процессами интерференции корабельных волн [8]. Анализ результатов большого числа модельных испытаний, проведенных под руководством М.Я. Алферьева [5,7,11,12], показывает что коэффициент остаточного сопротивления, например, при изменении числа Фруда на 6,6% увеличивается на 44% и более, а сами

графики коэффициентов остаточного и полного сопротивления речных катамаранов [8] имеют большое число локальных экстремумов на участке до 0,2<Fr<0,3.

С точки зрения эксплуатации судов такого типа, даже небольшие колебания гидродинамических характеристик могут существенно влиять на эффективность всей логистической схемы, что требует дополнительных исследований в этой области чисел Фруда, в том числе обоснование формы корпусов большегрузных катамаранов.

Гидродинамике катамаранных судов посвящены работы многих отечественных ученых, например, Костюкова А.А., Ляховицкого А.Г., Дубровского В.Г. Яцука Ю.В. [13], в том числе для высокоскоростных катамаранов и Назарова А.Г. для малых катамаранов [14]. Зарубежные исследования характеристик многокорпусных судов посвящены в первую очеред скоростным и высокоростным судам, в том числе с уменьшенной площадью ватерлинии.

Так, в работе [15] на основании результатов модельных испытаний в опытовом бассейне показано, что форма корпусов катамарана существенно влияет на процессы образования и *трансформации* корабельных волн. Для катамарана с двумя корпусами S-образной формы в плане при правильном выборе площади поперечного сечения, горизонтального клиренса, кривизны корпуса, волны, генерируемые отдельными корпусами, взаимно компенсируются при сверхкритической расчетной скорости, и, следовательно, волновой след и волновое сопротивление могут быть существенно уменьшены. Было установлено, что волновое сопротивление катамарана может быть до 50%меньше, чем у эквивалентного катамарана с прямым корпусом. Исследования проводились при числах по осадке $Fr_{\mathrm{T}} = 1{,}7 - 1{,}8$ для натурного судна длиной 34,13 м при осадке 1,1 м.

Статья {16] посвящена оценке волнового сопротивления катамарана методами вычислительной гидродинамики в том числе для корпусов, расположенных «уступом». Результаты численного моделирования сравнивались с испытаниями в опытовом бассейне. Показано, что в диапазоне значений Fr от 0,35 до 0,7, может происходить благоприятная интерференция в волновой системе катамарана, причем смещение второго корпуса в корму относительно первого, способствует снижению общего сопротивления.

Для малых катамаранов в [17] были проведены серийные модельные испытания для исследования влияния на сопротивление и волнообразование изменения водоизмещения, клиренса и горизонтального смещения корпусов при числах Фруда 0,2 – 0,7.

В работе [18] исследовались волны в кильватерном следе катамаранов с плоскими внутренними и наружными бортами при L/B равных 12,2, 15,2 и 18,3 и относительных клиренсах по длине (S/L) 0,2, 0,3 и 0,4. Результаты, показали, что катамаран с плоским бортом наружу имеет меньший по длине кильватерный след, а корпуса с большим горизонтальным клиренсом или большими соотношениями L/B образуют меньшую высоту волн в кильватерном следе. Сделан вывод о том, что волновая картина в кильватерном следе существенно зависит от горизонтального клиренса.

В работе [19] для малых катамаранов водоизмещением до 3,2 т сделан вывод о том, что плоский наружный борт способствует снижению сопротивления по сравнению с однокорпусным судном и стандартным катамараном. На основании оценки волнового следа судна сделан вывод, что катамаран с плоским наружным бортом за счет благоприятной интерференции может генерировать волны меньшей высоты.

В статье [20] рассматриваются эффекты интерференции волн, создаваемых катамараном с одинаковыми корпусами в условиях *спокойной воде большой глубины*. Систематические вычисления выполнены для 125 чисел Фруда $Fr_s = \frac{v}{\sqrt{g\sqrt{S}}}$, где $s = \frac{S}{L}$, а S – горизонтальный клиренс катамарана. Исследования проводились в диапазоне $0{,}4 \le Fr_s \le 3{,}5$ и $0{,}2 \le s \le 0{,}8$ и семи простых математически определенных корпусов. Показано, что при определенных комбинациях относительного клиренса по длине и чисел Фруда сопротивление катамарана может быть меньше, чем суммарное сопротивление двух одиночных корпусов.

В работе [21] приведены результаты численного и экспериментального исследования гидродинамики катамарана с различными клиренсами и выполнено сравнение величин сопротивления для однокорпусного судна в диапазоне чисел Fr от 0,3 до 0,5. Авторы используют для оценки относительного сопротивления фактор *IF,* который определяется как

$$IF = \frac{R_{Tcat} - 2R_{Tmh}}{2R_{Tmh}}$$

где, R_{Tcat} – полное сопротивление катамарана;

R_{Tmh} – сопротивление однокорпусного судна.

В результате показано, что в зависимости от горизонтального клиренса при одной и той же скорости движения фактор *IF* может изменяться более чем на 100%. Следует отметить, что относительный клиренс составлял 0,848 и 1,458.

Влияние изменения формы кормы на волнообразование катамаранного судна исследовано в работе [22] методами вычислительной гидродинамики. Оптимальная форма транца выбиралась в том числе и на основании анализа волновой поверхности за судном.

В одной из последних работ [23] для модели в масштабе 1:16 с плоскими внутренними и наружными бортами для относительного клиренса по длине (s/L = 0,20; 0,30; 0,35) в диапазоне чисел Фруда, соответствующих скоростям 12–20 узлам натурного судна, также исследованы гидродинамические характеристики катамаранов. Полученные результаты также свидетельствуют о существенном влиянии формы корпуса катамарана на его сопротивление. Анализ литературных источников позволяет утверждать, что изменения формы корпуса катамарана и скорости его движения влияют на волновое сопротивление сильнее, чем для однокорпусного судна.

В то же время большая часть известных исследований в области гидродинамики катамаранов посвящена выскороскоростным морским и речным катамаранам с относительно небольшими размерениями при числах Фруда, за пределами величин, характерных для большегрузных катамаранов на ВВП. Многие работы посвящены

исследованию интерференции волн между корпусами катамарана, но для эксплуатации на ограниченных по габаритам участках ВВП важно также оценить характеристики всех систем волн, генерирумых судном, что немаловажно для оценки возможности разрушения берегов и ложа водоемов, воздействия на прибрежные сооружения в случае высокой интенсивноси судоходства, а также ограниченные воможности изменения формы корпуса речных судов (например, невозможность использования малой площади ватерлинии).

В связи с этим целью настоящей работы является исследование гидродинамических характеристик и волнообразования большегрузного катамарана для внутренних водных путей еропейской части России при скоростях движения, соответствующих *доволновому* режиму при Fr_L<0,3 с различными формами корпуса.

Постановка задачи и описание численных экспериментов

Анализ исследовательской документации и опыта эксплуатации катамаранных судов Р-19 и Кт-619 с острыми («крейсерскими») обводами [6,7] показал, что эти суда имели некоторые недостатки: образование волн большой высоты в районе миделя, которые приводили к «замыванию» моста и снижению скорости; трудности с размещением механизмов и оборудования в корпусах и т.д. Предполагается, что современные большегрузные речные катамараны должны иметь гораздо большую полноту корпуса и цилиндрическую вставку для размещения механизмов, запасов, экипажа и пассажиров при использовании в качестве парома [2,3,8].

Согласно отчетам о НИР [7,9] в опытовом бассейне были исследованы: катамаран с разрезным корпусом с плоским внутренним бортом; катамаран с относительно полными обводами; катамаран с острыми обводами (рис.5) и сделан вывод о целесообразности использования несимметричных корпусов катамаранов с соотношением бортов 0,35 и 0,65. Для катамаранов с размерениями: длина *L*=95 м., ширина *B*=6,14 м., высота борта *H*=4,4 м., осадка *T*=2,9 м., относительный клиренс $\bar{C} = C/2 \cdot B = 0{,}3;\ 0{,}35;\ 0{,}4;\ 0{,}44;\ 0{,}5;\ 0{,}56$ при грузоподъемности 1000 т, имеющего цилиндрическую вставку результаты численного моделирования приведены в работе [25]. Общий вывод, который можно сделать по результатам ранее выполненных в данной работе исследований: существуют соотношения чисел Фруда и относительных клиренсов, при которых обеспечивается уменьшение коэффициента сопротивления. Причем для катамарана с несимметричными корпусами при соотношении бортов 0,35 и 0,65 (Fr=0,255 и Fr=0,236) существенно проявляется влияние несимметрии корпусов (рис.5). Также сделан вывод о существенном влиянии длины судна на процессы трансформации волн в междукорпусном пространстве, которые и обуславливают отличия в сопротивлении.

По этой причине в дополнение к ранее выполненным нами исследованиям гидродинамики большегрузного катамарана с симметричным и плоским внутренним бортом [8], было проведено моделирование несимметричного полнообводного катамарана с соотношением бортов 0,35/0,65.

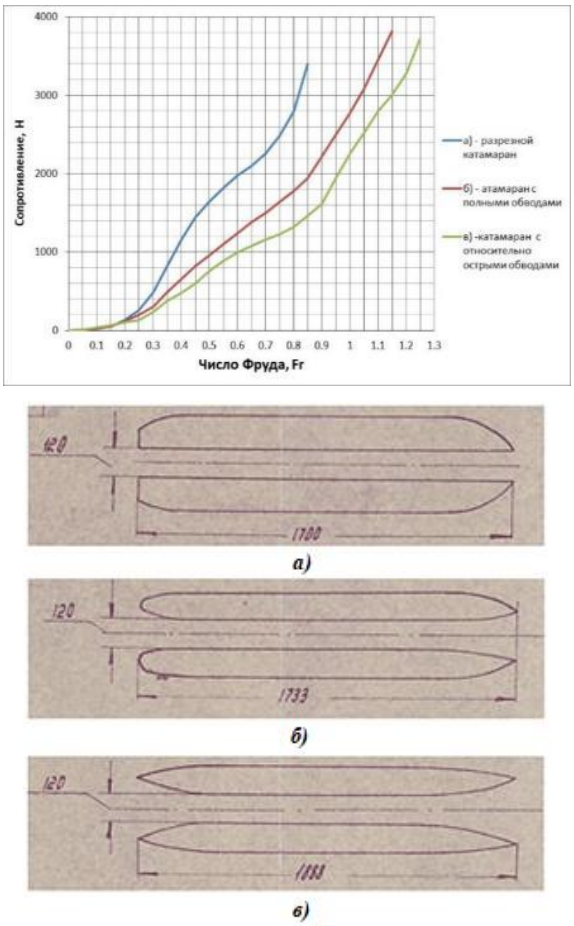


Рис. 5. Кривые буксировочного сопротивления для катамарана с разными формами корпусов по М.Я. Алферьеву [6]: а) разрезной корпус с плоским внутренним бортом; б) катамаран с относительно полными обводами; в) корпуса с острыми обводами.

Для численного моделирования использовался программный комплекс вычислительной гидродинамики NUMECA/FineMarine™. Параметры численного моделирования, в том числе начальные и граничные условия, характеристики расчетной сетки и используемые модели турбулентности, а также верификация результатов, подробно описаны в ранее выполненных и опубликованных работах [8,25,26] и других. Необходимо отметить, что при задании параметров моделирования, в том числе расчетной сетки, учитывалась необходимость более тщательного решения в *областях трансформации* (интерференции, отражения и т.д.) волн, что привело к более «тяжелой» задаче по сравнению с определением «чистого» сопротивления. В настоящей работе приведены только результаты моделирования и их анализ.

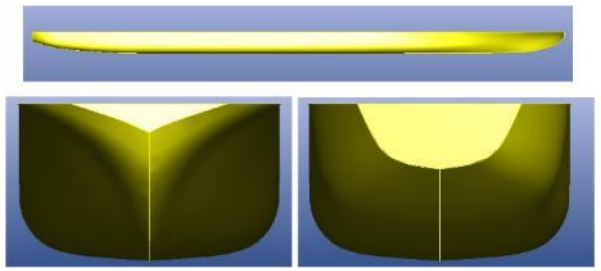
Численное моделирование выполнялось для трех вариантов длин катамаранов 112, 132 и 152 м. В эксперименте изменялась ширина каждого корпуса и клиренс между корпусами. Основные характеристики катамаранов приведены в табл. 1. Максимальная ширина судна – 28м обусловлена возможностью прохождения через шлюзы Волжского каскада [1-4].

Характеристики катамаранов приведены в табл. 1, форма корпусов представлена на рис. 6.

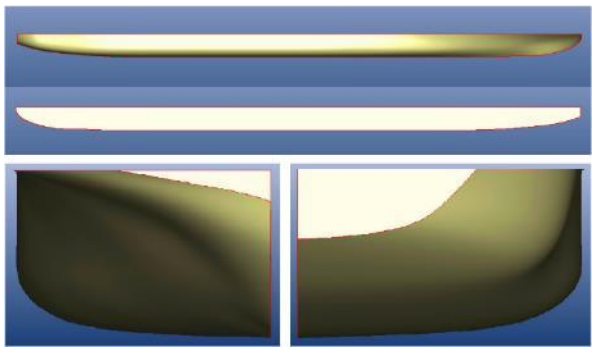
Таблица 1

Характеристики вариантов большегрузных катамаранов

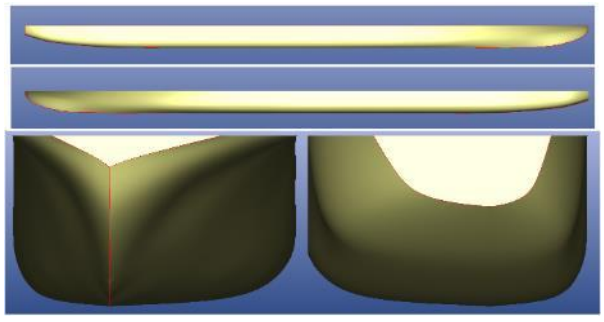
	Катамаран с симметричными корпусами		Катамаран с плоским внутренним бортом		Катамаран с несимметричными бортами	
Длина по КВЛ, м	112, 132, 152					
Ширина одного корпуса, м	10	9	10	9	10	9
Осадка по КВЛ, м	2,8		2,8		2,8	
Высота борта, м	6		6		6	
Относительный клиренс	0,3; 0,35; 0,4; 0,44; 0,5; 0,56					
Скорость, м/с	7; 7,5; 8,1; 8,6; 9,17; 11,7					



а)



б)

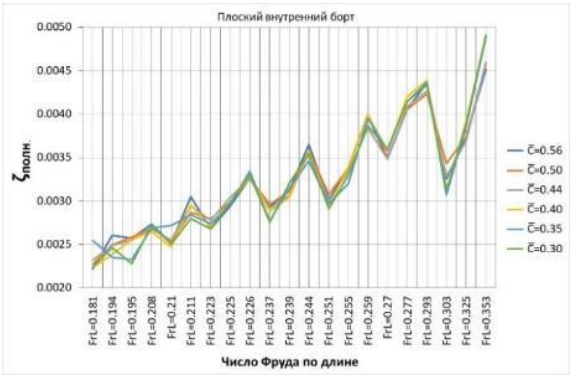


в)

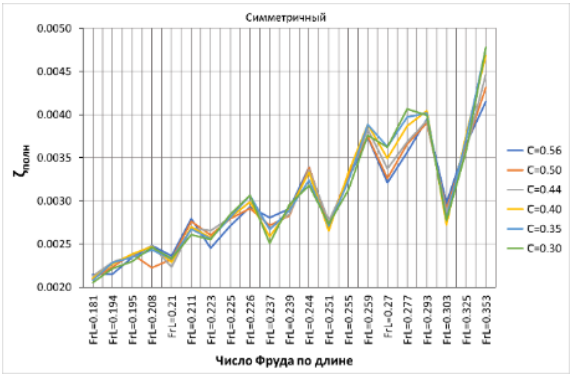
Рис. 6. Геометрия корпусов катамарана: а) симметричный; б) с плоским внутренним бортом; в) несимметричный корпус в соотношении 0,35/0,65.

Результаты и обсуждение

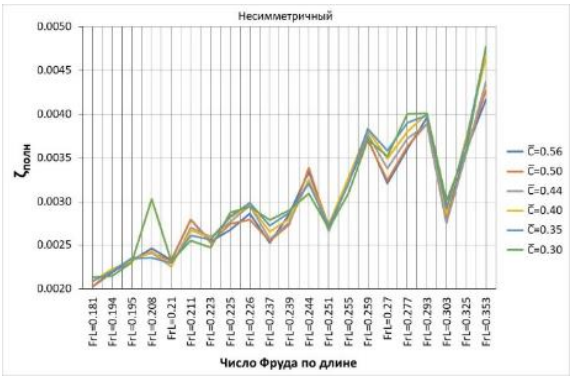
Ввиду того, что гидродинамические характеристики катамаранов существенно зависят от процессов образования и *трансформации* волн, которые в отличие от однокорпусного судна определяются не только длиной, но и горизонтальным клиренсом. Для всего диапазона чисел Фруда, аналогично графикам М.Я. Алферьева, построены зависимости сопротивления от числа Фруда по длине от относительных клиренсов катамарана (рис. 7).



а)



б)



в)

Рис. 7. Зависимость коэффициентов сопротивления от числа Фруда по длине относительных клиренсов катамарана: а) с плоским внутренним бортом; б) симметричный; в) несимметричный.

Из рассмотрения графиков рис. 7 видно, что существенные скачкообразные изменения коэффициента сопротивления от числа Фруда сохраняются и для большегрузных речных

катамаранов в диапазоне Fr_L=0,181-0,353. При этом амплитуда этих изменений увеличивается при повышении скорости судна (рис. 7 и 8). В различных работах, посвященных гидродинамике многокорпусных судов указывается, что «горб сопротивления» для таких судов находится за пределами Fr_L=0,3-0,4, однако для речных катамаранов большой грузоподъёмности рабочие числа Фруда не должны превышать Fr_L=0,277 (т.е. скоростей движения около 30 км/ч, что позволяет избежать ограничений, применяемым к скоростным судам). Таким образом, режим движения большегрузных речных катамаранов будет находиться в переходной, т.е. *доволновой области* [5]. Полученные результаты позволяют утверждать, что для речных катамаранов существуют сочетания скорости движения и размерений, с локально минимальными коэффициентами сопротивления.

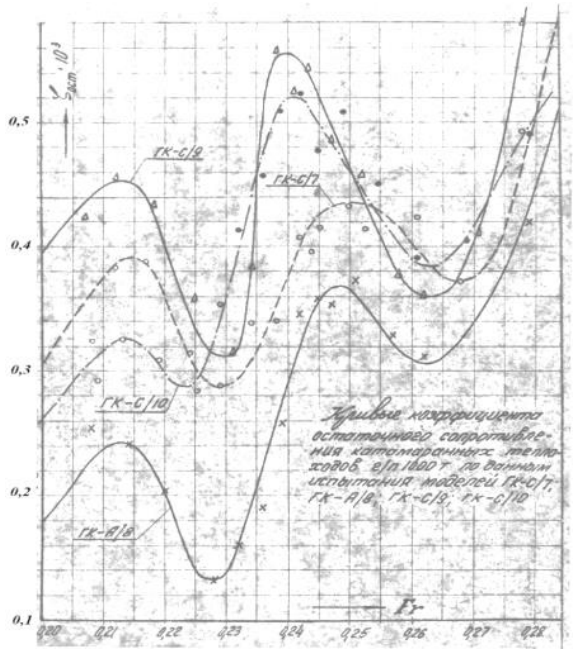
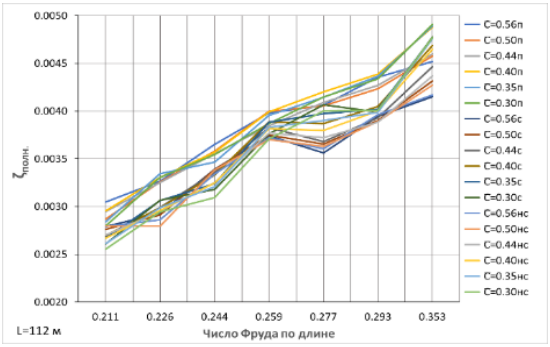


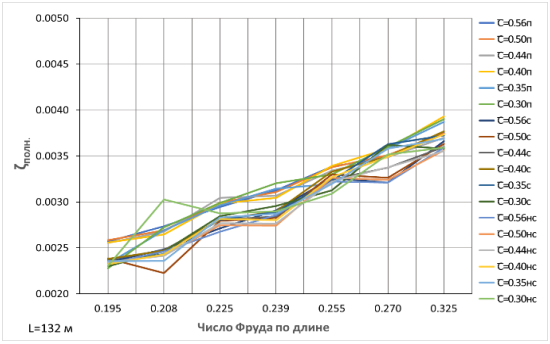
Рис. 8. Графики коэффициентов остаточного сопротивления речных катамаранных судов по данным модельных испытаний М.А. Алферьева

Из графиков (рис. 7) видно, что минимумы и максимумы для всех форм моделируемых корпусов, соответствуют одним и тем же числам Фруда, т.е. по всей видимости зависят от скорости и длины корпусов, и соответственно от процессов трансформации волн, что подтверждается работами [21-23]. Как видно из рис.7, для всех трех типов корпусов коэффициент сопротивления сравнительно слабо меняется при изменении относительно клиренса, за исключением локальных минимумов для чисел Фруда в окрестности значений около 0,24 и 0,27 для симметричного и несимметричного корпусов. Следует отметить, что числа Fr по длине для указанных минимумов сопротивления отвечают соответственно двум и трем значениям длин поперечных (“кормовых”) волн $\lambda_{\text{корм}} = 2\pi v^2/g$, укладывающихся на длине корпусов. Это неплохо согласуется с волновыми структурами, приведенными ниже. При этом волны, возбуждаемые источником вблизи носа судна, частично интерферируют с волнами, возбуждаемые кормовой частью судна, учитывая, что кормовой источник находится в противофазе с носовым. Более детальные теоретические оценки связи коэффициента сопротивления с особенностями структуры волн будут даны позднее в отдельной работе.

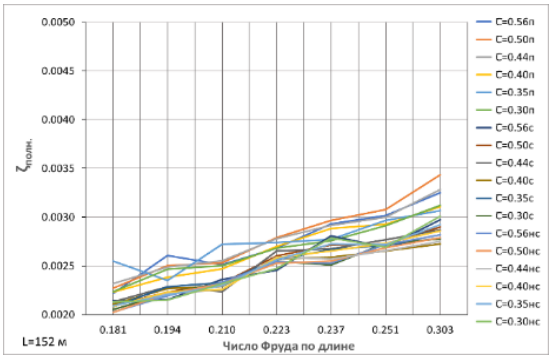
В общем случае коэффициенты сопротивления для катамарана с плоским внутренним бортом оказываются выше, чем с симметричным и несимметричным (рис. 9). В то же время интерес представляют числа Фруда 0,259; 0,277; 0,293 – для L=112 м; 0,225; 0,239; 0,255; 0,270 – для L=132 м; 0,210; 0,223; 0,237; 0,251 для L=152 м. В этих случаях на графиках наблюдаются изломы для разных относительных клиренсов, причем минимальные значения в основном соответствуют несимметричным корпусам, однако для некоторых $\bar{C}$. Наблюдаются при этих же числах локальные максимумы (рис. 9).



а)



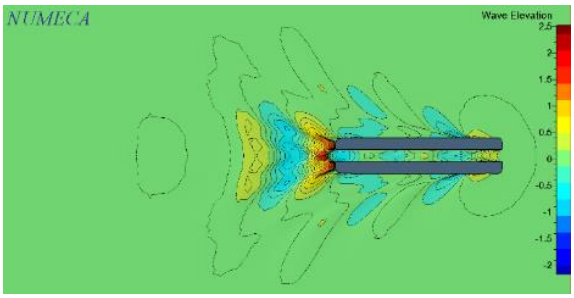
б)



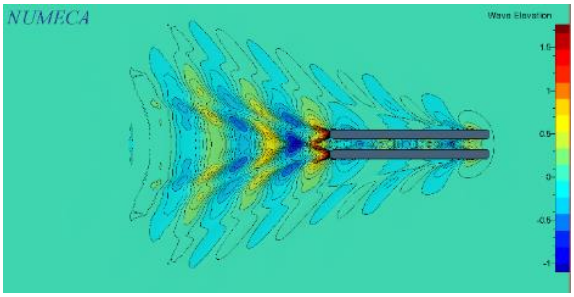
в)

Рис. 9. Зависимость коэффициентов полного сопротивления от относительного клиренса для катамарана с плоским внутренним бортом (п); несимметричный корпус (нс); симметричный корпус (с): а) L=112м; б) L=132 м; b) 152 м.

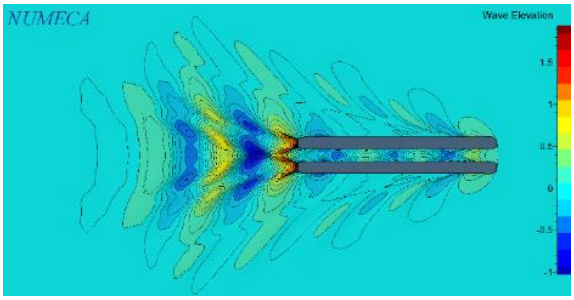
По всей видимости такие изменения в графиках коэффициентов сопротивления обусловлено волновыми процессами, происходящими между корпусами катамаранов. При движении корпусов образуются поперечные системы волн, длина которых зависит от горизонтального клиренса катамарана, длина поперечных (стационарных) волн зависит от скорости судна и которые в свою очередь могут вызывать существенное изменение коэффициентов сопротивления при одном и том же числе Фруда по длине (Fr_L).



а)



б)



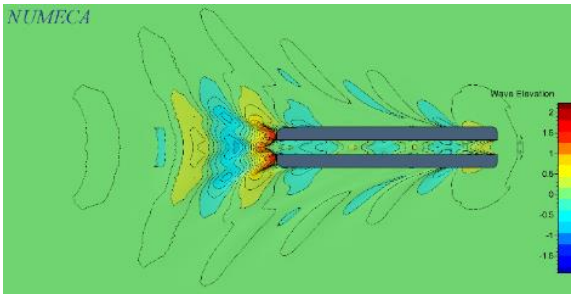
в)

Рис. 11. Волновая поверхность катамарана длиной 152 м, при относительном клиренсе $\bar{C} = 0{,}56$, при Fr=0,237 (v=9,17 м/с): а) плоский внутренний борт; б) симметричный корпус; в) несимметричный корпус 0,35/0,65.

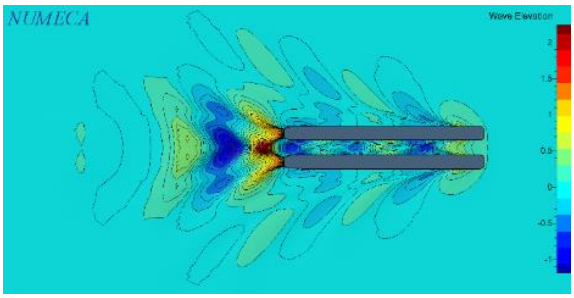
Заключение

Выполнено исследование гидродинамических характеристик крупнотоннажных катамаранов для внутренних водных путей с использованием программного комплекса CFD NUMECA/FineMarine™. Исследованы три варианта длины судна – 112, 132 и 152 м, шесть вариантов относительного клиренса для плоского, симметричного и несимметричного (0,35/0,65) внутреннего борта.

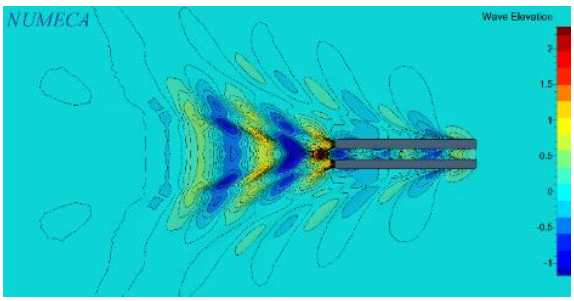
Полученные результаты позволяют утверждать, что для речных катамаранов в диапазоне длин судна от 112 до 152 м при числах Фруда от 0,181 до 0,353 существуют комбинации обводов корпуса (формы внутреннего борта и длины судна), горизонтального клиренса и скорости движения, при которых будет наблюдаться уменьшение коэффициента сопротивления. Существенные изменения коэффициентов сопротивления в данном диапазоне числе Фруда обусловлены процессами трансформации волн (интерференции, дифракции, отражения и преломления) в междукорпусном пространстве катамарана. Для локальных минимумов сопротивления при числах Фруда по длине в окрестности значений около 0,24 и 0,27 для симметричного и несимметричного корпусов отвечают соответственно двум и трем значениям длин поперечных (“кормовых”) волн укладывающихся на длине корпусов. Волны, возбуждаемые источником вблизи носа судна, частично интерферируют с волнами, возбуждаемые кормовой частью судна, учитывая, что кормовой источник находится в противофазе с носовым. В то же время объем настоящей статьи не позволяет полностью рассмотреть все особенности физических процессов трансформации волн в междукорпусном пространстве катамарана, что будет выполнено в отдельной работе.



а)



б)



в)

Рис. 12. Волновая поверхность катамарана длиной 152 м, при относительном клиренсе $\bar{C} = 0{,}56$, при Fr=0,27 (v=9,7 м/с): а) плоский внутренний борт; б) симметричный корпус; в) несимметричный корпус 0,35/0,65.

Литература

1. Минеев В.И., Митрошин С.Г., Ефремов Н.А., Костров В.Н., Этин В.Л. Инновационные технологии - основа развития речного транспорта в XXI веке. Речной транспорт (XXI век). 2009. Т. 4. № 6. С. 34.
2. Этин В.Л., Лукина Е.А., Милавин С.А. «Проектирование речных скоростных грузовых накатных судов катамаранного типа». / 12-ый междунар. научно-промышленный форум "Великие реки-2010":Труды конгресса. Т.2. Н. Новгород, Нижегород. госуд. архит.-строит. ун-т - Н. Новгород: НГАСУ, 2011. – С.37-44.
3. Костров В.Н., Телегин А.И., Митрошин С.Г. Моделирование и продвижение новых технологий в паромно-транспортной логистической системе. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2008. № 24. С. 132-136.
4. Лукина Е.А., Митрошин С.Г., Битков Д.А. «Обоснование применения накатного судна для паромно-транспортных грузовых перевозок в Волжско-Камском бассейне». / Вестник ВГАВТ. Вып.28.- Н.Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2009. – С.56-62.
5. Алферьев М.Я., Мадорский Г.С. Транспортные катамараны внутреннего плавания. М., изд. «Транспорт», 1975, 336 с.
6. Горьковский институт инженеров водного транспорта, Кафедра теории корабля №ТБ-76. Отчет об исследовательской работе по теме №21/2315 «Результаты натурных испытаний опытного грузового теплохода-катамарана Кт-619 в навигацию 1962г», г. Горький, 1962г.
7. Горьковский институт инженеров водного транспорта, Кафедра теории корабля №ТБ-25. Отчет по теме №17 «Изыскание новых типов судов для скоростных перевозок»», г. Горький, 1958 г.
8. Исследование волнообразования большегрузного катамарана для внутренних водных путей численными методами / Е. Ю. Чебан, Е. А. Лукина, С. Г. Митрошин [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 3-1(61). – С. 210-219. – DOI 10.37220/MIT.2023.61.3.021. – EDN PERDQG.
9. Горьковский институт инженеров водного транспорта, Кафедра теории корабля №ТБ-38. Отчет по теме №17 «Обоснование форм и размеров грузового катамарана Ка-600Т», г. Горький, 1958 г.
10. Чебан, Е. Ю. Натурное численное моделирование гидродинамики катамарана кт-619 / Е. Ю. Чебан, М. Н. Москалева // Транспорт. Горизонты развития : Труды 5-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород-Новосибирск-Владивосток, 20–23 мая 2025 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2025. – С. 102. – EDN WDVIYU.
11. Горьковский институт инженеров водного транспорта, Кафедра теории корабля №ТБ-126-1. Методика определения оптимальных относительных размеров и формы обводов катамаранов. г. Горький, 1976г.
12. Ушаков, К. М. Экспериментальное исследование влияния параметров катамарана на остаточное сопротивление / К. М. Ушаков, Ю. В. Яцук // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2023. – Т. 15, № 2. – С. 295-303. – DOI 10.21821/2309-5180-2023-15-2-295-303. – EDN AAELZL.
13. Ушаков, К. М. Исследование буксировочного сопротивления катамарана с упрощенными обводами / К. М. Ушаков, Ю. В. Яцук, А. Г. Саченко // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2025. – Т. 17, № 1. – С. 127-137. – DOI 10.21821/2309-5180-2025-17-1-127-137. – EDN NLJFNC.
14. Назаров, А. Г. О пропорциях катамаранов и нормировании их остойчивости / А. Г. Назаров // Научные проблемы водного транспорта. – 2021. – № 68. – С. 88-97. – DOI 10.37890/jwt.v68.203. – EDN PXMXKV.
15. Xue-Nong Chen, Som D. Sharma, and Norbert Stuntz Wave Reduction by S-Catamaran at Supercritical Speeds Journal of Ship Research, Vol. 47, No. 1, March 2003, pp. 1–10
16. Prasanta K. Sahoo, Lawrence J. Doctors, Luke Pretlove CFD prediction of the wave resistance of a catamaran with staggered demihulls MAHY 2006: International Conference on Marine Hydrodynamics 5-7January 2006, Visakhapatnam, India
17. F. Caprio, C. Pensa, Experimental Investigation on Two Displacement Catamarans: Systematic Variation of Displacement, Clearance and Stagger, Article in The International Journal of Small Craft Technology, January 2007, IJSCT Vol 149, DOI: 10.3940/rina.ijsct.2007.b1.6707
18. O.B. Yaakoba, A. Nasirudin, M.P. Abdul Ghani, T. Mat Lazim, M.A. Abd Mukti, Y.M. Ahmed. Parametric study of a low wake-wash inland waterways catamaran. Scientia Iranica B (2012) 19 (3), 463–471
19. Sunardi, Anthon Efani, Oktiyas Muzakky L. Design of Eco-Friendly Shallow Draft Fishing Vessel, Research journal of life science E-ISSN : 2355-9926, Desember-2015 Volume 02 N. 03 p. 199-204
20. Jiayi He, Chenliang Zhang, Yi Zhu, Lu Zou, Wei Li, Francis, Noblesse Interference effects on the Kelvin wake of a catamaran represented via a hull-surface distribution of sources. European Journal of Mechanics B/Fluids 56 (2016) 1–12
21. Andrea Farkas, Nastia Degiuli, Ivana Martić. Numerical assessment of interference resistance for a series 60 catamaran. VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, MARINE 2017, p. 1016-1027.
22. Vasilij Djačkov, Tomas Žapnickas, Jonas Čerka, Rima Mickevičienė, Žydrūnas Ašmontas, Lukas Norkevičius, Ieva Ronkaitytė, Peilin Zhou, Eduardo Blanco-Davis. Numerical simulation of a research vessel's aftpart hull form. Ocean Engineering 169 (2018) 418-427
23. Ариенчук, А. С. Исследование интерференции корабельных волн асимметричного катамарана / А. С. Ариенчук, Е. А. Чуреев // Известия КГТУ. – 2026. – № 81. – С. 101-113. – DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-101-113. – EDN NOMUHW.
24. Численные методы в механике жидкости: учебное пособие / Д.В. Никущенко. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГМТУ, 2025. – 144 с. ISBN 978-5-88303-720-6

25. Чебан, Е. Ю. Исследование влияния несимметричных корпусов на гидродинамику речного катамарана грузоподъемностью 1000т / Е. Ю. Чебан, М. Н. Москалева, А. И. Кожевников // Научные проблемы водного транспорта. – 2025. – № 84. – С. 56-68. – DOI 10.37890/jwt.vi84.617. – EDN IRIGOA.
26. Никущенко, Д. В. Сопротивление воды движению судов и безэкипажных систем : учебное пособие / Д. В. Никущенко. – Санкт-Петербург : СПбГМТУ, 2026. – 104 с. – ISBN 978-5-88303-762-6. – EDN ZRCVVL.

References

1. Mineev V.I., Mitroshin S.G., Efremov N.A., Kostrov V.N., Etin V.L. Innovatsionnye tekhnologii - osnova razvitiya rechnogo transporta v XXI veke [Innovative technologies - the basis for the development of river transport in the 21st century]. Rechnoy transport (XXI vek) [River Transport (XXI Century)], 2009; 4(6): 34.
2. Etin V.L., Lukina E.A., Milavin S.A. Proektirovaniye rechnykh skorostnykh gruzovykh nakatnykh sudov katamarnogo tipa [Design of river high-speed cargo Ro-Ro ships of catamaran type]. In: 12-y mezhdunarodny nauchno-promyshlenny forum "Velikiye reki-2010": Trudy kongressa [12th International Scientific and Industrial Forum "Great Rivers 2010": Congress Proceedings]. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NGASU); 2011. Vol. 2. p. 37-44.
3. Kostrov V.N., Telegin A.I., Mitroshin S.G. Modelirovaniye i prodvizheniye novykh tekhnologiy v paromno-trasportnoy logisticheskoy sisteme [Simulation and advancement of new technologies in the ferry-transport logistics system]. Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta [Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport], 2008; (24): 132-136.
4. Lukina E.A., Mitroshin S.G., Bitkov D.A. Obosnovaniye primeneniya nakatnogo sudna dlya paromno-trasportnykh gruzovykh perevozok v Volzhsko-Kamskom basseyne [Justification for the use of a Ro-Ro ship for ferry-transport cargo transportation in the Volga-Kama basin]. Vestnik VGAVT [Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport], 2009; (28): 56-62.
5. Alfyev M.Ya., Madorsky G.S. Transportnye katamarany vnutrennego plavaniya [Inland waterway transport catamarans]. Moscow: Transport Publishing House; 1975. 336 p.
6. Gorkovskiy institut inzhenerov vodnogo transporta, Kafedra teorii korablya №ТВ-76 [Gorky Institute of Water Transport Engineers, Department of Ship Theory No. TB-76]. Otchet ob issledovatelskoy rabote po teme №21/2315 "Rezultaty naturnykh ispytaniy opytnogo gruzovogo teplokhoda-katamarana Kt-619 v navigatsiyu 1962g" [Report on research work on topic No. 21/2315 "Results of full-scale tests of the experimental cargo motor ship-catamaran Kt-619 in the 1962 navigation season"]. Gorky; 1962.
7. Gorkovskiy institut inzhenerov vodnogo transporta, Kafedra teorii korablya №ТВ-25 [Gorky Institute of Water Transport Engineers, Department of Ship Theory No. TB-25]. Otchet po teme №17 "Izyskaniye novykh tipov sudov dlya skorostnykh perevozok" [Report on topic No. 17 "Exploration of new ship types for high-speed transportation"]. Gorky; 1958.
8. Cheban E.Yu., Lukina E.A., Mitroshin S.G. et al. Issledovaniye volnoobrazovaniya bolshegruzogo katamarana dlya vnutrennikh vodnykh putey chislennymi metodami [Investigation of wave formation of a heavy-load catamaran for inland waterways by numerical methods]. Morskie intellektualnye tekhnologii [Marine Intelligent Technologies], 2023; (3-1(61)): 210-219. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.021. EDN: PERDQG.
9. Gorkovskiy institut inzhenerov vodnogo transporta, Kafedra teorii korablya №ТВ-38 [Gorky Institute of Water Transport Engineers, Department of Ship Theory No. TB-38]. Otchet po teme №17 "Obosnovaniye form i razmerov gruzovogo katamarana Ka-600T" [Report on topic No. 17 "Justification of forms and dimensions of the Ka-600T cargo catamaran"]. Gorky; 1958.
10. Cheban E.Yu., Moskaleva M.N. Naturnoye chislennoye modelirovaniye gidrodinamiki katamarana Kt-619 [Full-scale numerical simulation of the Kt-619 catamaran hydrodynamics]. In: Transport. Gorizonty razvitiya: Trudy 5-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma [Transport. Horizons of Development: Proceedings of the 5th International Scientific and Industrial Forum], Nizhny Novgorod-Novosibirsk-Vladivostok, May 20–23, 2025. Nizhny Novgorod: Volga State University of Water Transport; 2025. p. 102. EDN: WDVIYU.
11. Gorkovskiy institut inzhenerov vodnogo transporta, Kafedra teorii korablya №ТВ-126-1 [Gorky Institute of Water Transport Engineers, Department of Ship Theory No. TB-126-1]. Metodika opredeleniya optimal'nykh otnositel'nykh razmerov i formy obvodov katamaranov [Methodology for determining the optimal relative dimensions and hull lines shape of catamarans]. Gorky; 1976.
12. Ushakov K.M., Yatsuk Yu.V. Eksperimental'noye issledovaniye vliyaniya parametrov katamarana na ostatochnoye soprotivleniye [Experimental study of the influence of catamaran parameters on residual resistance]. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. Admirala S.O. Makarova [Bulletin of the State University of Maritime and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov], 2023; 15(2): 295-303. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-295-303. EDN: AAELZL.
13. Ushakov K.M., Yatsuk Yu.V., Sachenko A.G. Issledovaniye buksirovochnogo soprotivleniya katamarana s uproshchennymi obvodami [Investigation of tow resistance of a catamaran with simplified hull lines]. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. Admirala S.O. Makarova [Bulletin of the State University of Maritime and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov], 2025; 17(1): 127-137. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-127-137. EDN: NLJFNC.
14. Nazarov A.G. O proporciyakh katamaranov i normirovanii ikh ostoychivosti [On the proportions of catamarans and standardization of their stability]. Nauchnye problemy vodnogo transporta [Scientific Problems of Water Transport], 2021; (68): 88-97. DOI: 10.37890/jwt.v68.203. EDN: PXMXKV.
15. Xue-Nong Chen, Som D. Sharma, and Norbert Stuntz Wave Reduction by S-Catamaran at Supercritical Speeds Journal of Ship Research, Vol. 47, No. 1, March 2003, pp. 1–10

16. Prasanta K. Sahoo, Lawrence J. Doctors, Luke Pretlove CFD prediction of the wave resistance of a catamaran with staggered demihulls MAHY 2006: International Conference on Marine Hydrodynamics 5-7January 2006, Visakhapatnam, India
17. F. Caprio, C. Pensa, Experimental Investigation on Two Displacement Catamarans: Systematic Variation of Displacement, Clearance and Stagger, Article in The International Journal of Small Craft Technology, January 2007, IJSCT Vol 149, DOI: 10.3940/rina.ijsct.2007.b1.6707
18. O.B. Yaakoba, A. Nasirudin, M.P. Abdul Ghani, T. Mat Lazim, M.A. Abd Mukti, Y.M. Ahmed. Parametric study of a low wake-wash inland waterways catamaran. Scientia Iranica B (2012) 19 (3), 463–471
19. Sunardi, Anthon Efani, Oktiyas Muzakky L. Design of Eco-Friendly Shallow Draft Fishing Vessel, Research journal of life science E-ISSN : 2355-9926, Desember-2015 Volume 02 N. 03 p. 199-204
20. Jiayi He, Chenliang Zhang, Yi Zhu, Lu Zou, Wei Li, Francis, Noblesse Interference effects on the Kelvin wake of a catamaran represented via a hull-surface distribution of sources. European Journal of Mechanics B/Fluids 56 (2016) 1–12
21. Andrea Farkas, Nastia Degiuli, Ivana Martić. Numerical assessment of interference resistance for a series 60 catamaran. VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, MARINE 2017, p. 1016-1027.
22. Vasilij Djačkov, Tomas Žapnickas, Jonas Čerka, Rima Mickevičienė, Žydrūnas Ašmontas, Lukas Norkevičius, Ieva Ronkaitytė, Peilin Zhou, Eduardo Blanco-Davis. Numerical simulation of a research vessel's aftpart hull form. Ocean Engineering 169 (2018) 418-427
23. Arienchuk A.S., Chureyev E.A. Issledovaniye interferentsii korabelnykh voln asimmetrichnogo katamarana [Investigation of the interference of ship waves of an asymmetric catamaran]. Izvestiya Kaliningradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Izvestiya of Kaliningrad State Technical University], 2026; (81): 101-113. DOI: 10.46845/1997-3071-2026-81-101-113. EDN: NOMUHW.
24. Nikushchenko D.V. Chislennyye metody v mekhanike zhidkosti: uchebnoye posobiye [Numerical methods in fluid mechanics: textbook]. Saint Petersburg: Izd-vo SPbGMTU [Publishing House of Saint Petersburg State Marine Technical University]; 2025. 144 p. ISBN: 978-5-88303-720-6.
25. Cheban E.Yu., Moskaleva M.N., Kozhevnikov A.I. Issledovaniye vliyaniya nesimmetrichnykh korpusov na gidrodinamiku rechnogo katamarana gruzopod"yemnost'yu 1000t [Investigation of the influence of asymmetric hulls on the hydrodynamics of a 1000-ton river catamaran]. Nauchnye problemy vodnogo transporta [Scientific Problems of Water Transport], 2025; (84): 56-68. DOI: 10.37890/jwt.vi84.617. EDN: IRIGOA.
26. Nikushchenko, D. V. Water Resistance to the Motion of Ships and Unmanned Systems: A Study Guide. Saint Petersburg: Saint Petersburg State Marine Technical University, 2026. 104 p. ISBN 978-5-88303-762-6. EDN ZRCVVL.

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.

ИНФОРМАЦИЯОБАВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Чебан Егор Юрьевич доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 603905, Нижний Новгород, Нестерова 5, e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Egor Yu. Cheban Dr. Sci. (Eng), Assistant professor, Professor of Department of Hydrodynamics, Ship Theory and Environment Safety of Ships Volga State University of Water Transport, 5 Nesterov St., Nizhny Novgorod, 603905, e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Кожевников Артур Игоревич аспирант кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 603905, Нижний Новгород, Нестерова 5, e-mail: nertenro@ro.ru

Artur I. Kozhevnikov Postgraduate Student, Department of Hydrodynamics, Ship Theory and Environmental Safety of Ships, Volga State University of Water Transport, 5 Nesterov St., Nizhny Novgorod, 603905, e-mail: nertenro@ro.ru

Никущенко Дмитрий Владимирович профессор, доктор технических наук, профессор кафедры океанотехники и морских технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, 190121 e-mail: Ndmitry@list.ru

Dmitry V. Nikushchenko Dr. Sci. (Eng), assistant professor, professor of Department of Ocean Engineering and Marine Technology, St. Petersburg state marine technical university, Lotsmanskaya st., 3, St. Petersburg 190121 e-mail: Ndmitry@list.ru

Ермаков Станислав Александрович доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой профессор гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 603905, Нижний Новгород, Нестерова 5; заведующий отделом ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», 603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46. e-mail: stas.ermakov8@gmail.com

Stanislav A. Ermakov D. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Hydrodynamics, Ship Theory, and Environmental Safety of Ships, Volga State University of Water Transport, 5 Nesterov St., Nizhny Novgorod, 603905, Russia; Head of the Department, A.V. Gaponov-Grekhov Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 46 Ulyanov St., Nizhny Novgorod, 603951, Russia. e-mail: stas.ermakov8@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.07.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 29.07.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 30.07.2026.

Научная статья
УДК 531.391.1:532.5.011
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.034

Определение коэффициента демпфирования численным методом для расчета амплитудно-частотных характеристик бортовой качки первого и второго порядка накрененного судна

Семенова В.Ю.[1] sem_viktoria@mail.ru**, Динцер А.И.**[1] cassraps19@gmail.com
[1]Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье рассматривается определение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) бортовой качки первого и второго порядка судна, имеющего начальный крен, как в условиях жидкости бесконечной глубины, так и на мелководье с учетом коэффициента демпфирования, полученного CFD-методом. Актуальность работы обусловлена необходимостью учета вязкостных эффектов при определении коэффициента демпфирования бортовой качки и отсутствием эмпирических формул для накрененных судов. Определение АЧХ бортовой качки второго порядка основано на применении двумерной теории, метода малого параметра и метода интегральных уравнений. Расчеты АЧХ с коэффициентом демпфирования бортовой качки, полученным с помощью программного пакета OpenFOAM сопоставлены с соответствующими расчетами, в которых использовались эмпирические формулы для судна при отсутствии угла крена, а именно нормативный документ РД5.1003-80 и формула Авдеева Г.К. Проведенные расчеты показали убедительные согласования результатов. Приведены результаты расчетов амплитудно-частотных характеристик бортовой качки первого и второго порядков для накрененных судов с учетом коэффициента демпфирования, полученного на основании применения OpenFOAM. Также приведены результаты расчетов амплитудно-частотных характеристик бортовой качки второго порядка при наличии угла крена и изменении относительной глубины h/T. Показано значительное влияние уменьшения относительной глубины h/T на АЧХ второго порядка.
Ключевые слова: АЧХ, мелководье, двухмерная теория, метод интегральных уравнений, функция Грина, нелинейные силы второго порядка, угол крена, CFD-методы
Для цитирования: Семенова В.Ю., Динцер А.И., Определение коэффициента демпфирования численным методом для расчета амплитудно-частотных характеристик бортовой качки первого и второго порядка накрененного судна., Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 86—94. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.034

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.034

Determination of the damping coefficient by a numerical method for calculating the first- and second-order response amplitude operators of roll motion for a heeled ship

Viktoriya Yu. Semenova[1] sem_viktoria@mail.ru**, Aleksandr I. Dintser**[1] cassraps19@gmail.com
[1]St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. This article examines the determination of the first- and second-order response amplitude operators (RAOs) of roll motion for a ship with an initial heel, both in deep water and in shallow water, taking into account the damping coefficient obtained by the CFD method. The relevance of the work is due to the need to account for viscous effects when determining the roll damping coefficient and the absence of empirical formulas for heeled ships. The determination of the second-order roll RAO is based on two-dimensional theory, the small-parameter method, and the integral equation method. The RAO calculations using the roll damping coefficient obtained with the OpenFOAM software package are compared with corresponding calculations that employed empirical formulas for the ship at zero heel angle, namely the regulatory document RD5.1003-80 and the Avdeev G.K. formula. The performed calculations have shown convincing agreement between the results. The results of calculations of the first- and second-order roll RAOs for heeled ships, with the damping coefficient derived from OpenFOAM, are presented. Additionally, the results of calculations of the second-order roll RAO for a heeled ship with varying relative depth h/T are provided. A significant effect of a decrease in the relative depth h/T on the second-order RAO is demonstrated.
Key words: RAO, shallow waters, two-dimensional potential theory, method of integral equations, Green's function, nonlinear forces of the second order, transverse motions, heel angle, CFD-methods
For citation: Viktoriya Yu. Semenova, Aleksandr I. Dintser, Determination of the damping coefficient by a numerical method for calculating the first- and second-order response amplitude operators of roll motion for a heeled ship. Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 86—94. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.034

Введение

Одним из существенных недостатков в процессе расчета амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) бортовой качки, является необходимость учета вязкостных эффектов при определении коэффициента демпфирования. Трудоемкость их точного учета приводит к необходимости

© Семенова В.Ю., Динцер А.И. 2026

использования эмпирических формул [11], [12], [14]. Особенно остро данная проблема стоит при определении АЧХ судна, имеющего начальный крен, поскольку использование эмпирических формул ограничивается только равновесным положением судна (прямо и на ровный киль).

При определении коэффициентов демпфирования для судна, не имеющего начальный крен применяются несколько основных способов:

применение формулы Моренштильдт В.А., используемой в руководящем документе по расчетам качки [13] ограничивается применением для легких быстроходных судов (L/B > 7,5; δ < 0,6) и учитывает только наличие скорости хода судна. Также, часто используется формула Авдеева Г.К. [12], требующая знания предварительно определенной амплитуды бортовой качки. Одновременно с этим иногда применяются номограммы В.В. Луговского [11]. Несмотря на то, что расчет демпфирования с учетом вязкости по номограммам ближе всего совпадают с экспериментами применение такого способа расчета ограничено диапазоном входных характеристик судна (отношение ширины к осадке, коэффициент полноты ватерлинии).

Вместе с тем, современные компьютерные технологии позволяют использовать методы вычислительной гидродинамики (CFD) для расчета демпфирования с учетом вязкости. Использование данных методов дает весьма корректные результаты [16]. В статье автора [7] приведены результаты расчета коэффициентов демпфирования бортовой качки при вынужденных колебаниях двух плоских контуров, находящихся в положении с начальным (аварийным) креном. Численные эксперименты, проведенные в пакете OpenFOAM при различных частотах продемонстрировали хорошее согласование расчетных значений коэффициента демпфирования μ'_{44} с известными экспериментальными данными Vugts [5].

На основании применения разработанной автором методики определения коэффициентов демпфирования в OpenFOAM и применяя гипотезу плоских сечений можно выполнить расчеты для всего судна как в равновесном, так и в накрененном положении путем интегрирования по длине коэффициентов демпфирования, определенных для отдельных шпангоутов.

Целью настоящей работы является определение коэффициентов демпфирования первого (линейного) и второго порядка (нелинейного) на основании методов вычислительной гидродинамики (CFD) и расчеты амплитудно-частотных характеристик бортовой качки первого и второго порядков с учетом этих коэффициентов.

Описание метода расчета

Определение коэффициентов демпфирования выполнено несколькими способами:

1) Демпфирование, учитывающее вязкость (OpenFOAM)

С целью снижения вычислительной сложности гидродинамические коэффициенты демпфирования определяются в рамках гипотезы плоских сечений, предполагающей независимое рассмотрение обтекания характерных шпангоутов судна и дальнейшим суммированием вдоль длины судна L.

В основе метода система уравнений, основанная на подходе осреднения уравнений Навье-Стокса по Рейнольдсу (1) с использованием гипотезы Буссинеска (2).

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \overline{u}_j \dfrac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} = F_i - \dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu \dfrac{\partial^2 \overline{u}_i}{\partial x_j^2} - \dfrac{\partial^2}{\partial x_j}\left(\overline{u_i' u_j'}\right); \\ \dfrac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

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

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

где $\vec{u}_i$, $\vec{u}_j$ – пульсационные (турбулентные) составляющие скорости, м/с;

ν_t – турбулентная кинематическая вязкость, м²/с;

δ_{ij} – символ Кронекера (безразмерный);

k – кинетическая энергия турбулентности, м²/с²;

Система замыкается с помощью модели турбулентности k-ω SST [7]:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{u}_j \dfrac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \dfrac{\partial}{\partial x_j}\left[\dfrac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\left(\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right)\right] + \dfrac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1}P + C_{\varepsilon 3}G) - C_{\varepsilon 2}\dfrac{\varepsilon^2}{k} \\ \dfrac{\partial \omega}{\partial t} + \overline{u}_j \dfrac{\partial \omega}{\partial x_j} = \dfrac{\partial}{\partial x_j}\left[\dfrac{\nu_t}{\sigma_\omega}\left(\dfrac{\partial \omega}{\partial x_j}\right)\right] + \dfrac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1}P + C_{\varepsilon 3}G) - \\ \qquad -(C_{\varepsilon 2} - 1)\omega^2 + \dfrac{\nu_t}{\sigma_\omega k}\dfrac{\partial \omega}{\partial x_j}\dfrac{\partial k}{\partial x_j}; \\ \dfrac{\partial k}{\partial t} + \overline{u}_j \dfrac{\partial k}{\partial x_j} = \dfrac{\partial}{\partial x_j}\left[\dfrac{\nu_t}{\sigma_t}\left(\dfrac{\partial k}{\partial x_j}\right)\right] + P + G - \varepsilon. \end{cases} \quad (3)$$

где σ_ω – турбулентное число Прандтля для переменной ω;

$C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, $C_{\varepsilon 3}$ – эмпирические константы модели турбулентности;

P – продукция турбулентной кинетической энергии (за счёт сдвига), м²/с³;

G – генерация турбулентности (за счёт сил плавучести), м²/с³;

ε – скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, м²/с³;

k – кинетическая энергия турбулентности, м²/с²;

ω – удельная скорость диссипации турбулентности, 1/с;

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

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

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

Условия на гранях расчётной области, используемые для разрешения задачи и более подробное описание расчетного метода приведены в работе [15].

Для частот при 3-4 полных периодах колебаний приведены результаты момента, действующего на контуры, во временной области.

По полученным амплитудам сил (моментов) M_x получены значения коэффициентов присоединённых масс и демпфирования, рассчитанные с помощью формул, описанных для экспериментальных

методов, при этом преобразовав их для соответствующего вида колебаний.

В данной работе результаты расчёта гидродинамических сил и значения частот приведены в виде, аналогичной работе J. Vugts [17]:

$$\mu'_{44}=\frac{\mu_{44}}{\rho A_{fr} B_{fr}^2}\sqrt{\frac{B_{fr}}{2g}}. \quad (5)$$

где A_{fr} – площадь контура, м^2;

B_{fr} – ширина контура по КВЛ, м.

После определения коэффициентов демпфирования для всех теоретических шпангоутов значение суммарного демпфирования при данной частоте определялось на основании гипотезы плоских сечений по формуле

$$\mu_{\Sigma 44}=\int_L \mu'_{44}dx=\Delta L\cdot\sum\mu'_{44}. \quad (6)$$

2) Демпфирование по РД5.1003-80

Формула, полученная В.А. Моренштильдт, а также аппроксимированная А. И. Шмуруном [14] в виде суммы двух составляющих:

$$\mu'_{44}=\nu_{o1}+\nu_{o2} \quad (7)$$

первая составляющая ν_{o1} из которых определяет сопротивление бортовой качке судна, не имеющего хода,

$$\nu_{o1}=10^{-2}(1{,}780\text{-}0{,}078\,\bar{\tau}_\theta)\left(0{,}500+0{,}050\frac{\dot{\theta}_o}{n_\theta}\right)\times \times\left[0{,}00125\left(\frac{B}{T}\right)^4+0{,}044+(0{,}262-\frac{0{,}484}{B/T})\,\bar{S}_к\right]\frac{B}{GM} \quad (8)$$

а вторая ν_{o2} учитывает влияние скорости хода.

$$\nu_{o2}=8\,\frac{T}{L}\bar{r}_m\left(\frac{z_g}{GM}-0{,}67\,\frac{T}{GM}\right)\frac{Fn}{\delta\,\bar{\tau}_\theta}\sqrt{\frac{L}{B}} \quad (9)$$

где $\frac{\dot{\theta}_0}{n_\theta}=\theta_0$ – амплитуда качки;

$\bar{\tau}_\theta=\tau_\theta\sqrt{g/B}$ – собственный период качки, *с*;

$\bar{S}_к$ – относительная площадь скуловых килей;

$Fn=v/\sqrt{gL}$ – число Фруда;

$\bar{r}_m$ – приведенный радиус цилиндра с эквивалентной судну величиной смоченной поверхности, по формуле Като:

$$\bar{r}_m=\frac{1}{\pi}\left[(0{,}887+0{,}145\delta)\left(1{,}7\frac{T}{B}+\delta\right)-2\left(\frac{T}{B}-\frac{z_g}{B}\right)\right]$$

δ – коэффициент общей полноты судна;

z_g – аппликата центра тяжести судна, м.

3) Демпфирование по формуле [11] Авдеева Г.К. - Анфимова А.В.

Зависимость, полученная из условия равенства работ, совершаемых демпфирующим моментом при квадратичном законе:

$$\mu'_{44}=\frac{8}{3\pi}w(I_{xx}+\lambda_{44})\theta_0\omega \quad (10)$$

где ω – частота возмущающего момента, 1/с;

I_{xx} – продольный момент инерции судна;

λ_{44} – присоединенная масса;

w – демпфирование при квадратичном законе

$$w=0{,}24+1{,}42\frac{GM}{B}\left(\frac{\alpha B\left(1+\frac{B}{6T}\right)}{4\rho'_x}\right)^2$$

где GM – начальная поперечная метацентрическая высота, м;

B – ширина судна, м;

α – коэффициент полноты ватерлинии;

T – осадка судна по КВЛ;

ρ'_x – приведенный радиус инерции, м

$$\rho'_x=\sqrt{\frac{I_{xx}+\lambda_{44}}{\rho\cdot V}}$$

В настоящей работе для определения АЧХ бортовой качки второго порядка расчет нелинейного момента проводился на основании работ авторов [4]-[6]. Для его определения вводятся четыре малых параметра, характеризующих соответственно относительные амплитуды ПГК (η_g), ВК (ζ_g), БК (θ) и волнение (a_w).

$$\varepsilon_2=\frac{\eta_g^{(1)}}{b};\quad \varepsilon_3=\frac{\zeta_g^{(1)}}{b};\quad \varepsilon_4=\frac{\theta^{(1)}}{1\text{rad}};\quad \varepsilon_7=\frac{a_w}{b}. \quad (11)$$

где b – полуширина текущего шпангоутного контура.

m – тип колебаний (2 – ПГК, 3 – ВК, 4 – БК, 7 – набегающее волнение).

Тогда потенциал скорости Φ может быть представлен в виде следующей суперпозиции:

$$\Phi(\eta,\zeta,t)=\Phi^{(1)}(\eta,\zeta,t)+\Phi^{(2)}(\eta,\zeta,t)= =\left(\sum_m \varepsilon_m\phi_m^{(1)}(\eta,\zeta)\right)e^{-i\omega t}+ +\left(\sum_{m,\,0+7}\varepsilon_m^2\phi^{(2)}_{m,\,0+7}(\eta,\zeta)\right)e^{-i2\omega t}, \quad (12)$$

где m = 2, 3, 4.

Здесь [2]:

$$\Phi^{(1)}(\eta,\zeta,t)=\left(\varepsilon_2\phi_2^{(1)}+\varepsilon_3\phi_3^{(1)}+\varepsilon_4\phi_4^{(1)}\right)\cdot e^{-i\omega t},$$
$$\Phi^{(2)}(\eta,\zeta,t)=\left(\varepsilon^2\cdot\left[\phi_{22}^{(2)}+\phi_{33}^{(2)}+\phi_{44}^{(2)}+\phi_{77}^{(2)}\right]+ +\varepsilon_2\varepsilon_3\cdot\phi_{23}^{(2)}+\varepsilon_3\varepsilon_4\cdot\phi_{34}^{(2)}+\varepsilon_2\varepsilon_4\cdot\phi_{24}^{(2)}+ +\varepsilon_2\varepsilon_7\cdot\phi_{2,0+7}^{(2)}+\varepsilon_3\varepsilon_7\cdot\phi_{3,0+7}^{(2)}+\varepsilon_4\varepsilon_7\cdot\phi_{4,0+7}^{(2)}\right)\cdot e^{-i2\omega t}.. \quad (13)$$

где $\phi_2^{(1)}, \phi_3^{(1)}, \phi_4^{(1)}$ – потенциалы первого порядка движений, вызванных ПГК, ВК и БК соответственно. Данные потенциалы определяются в результате решения соответствующих линейных задач;

$\phi_{22}^{(2)}, \phi_{33}^{(2)}, \phi_{44}^{(2)}, \phi_{77}^{(2)}$ – потенциалы, обусловленные изолированными ПГК, ВК и БК контура, а также дифракцией. Данные потенциалы определены в работе [3, 5];

$\phi_{23}^{(2)}, \phi_{34}^{(2)}, \phi_{24}^{(2)}$ – потенциалы, обусловленные совместными ПГК, ВК и БК контура, определенные в работе;

$\phi_{2,0+7}^{(2)}, \phi_{3,0+7}^{(2)}, \phi_{4,0+7}^{(2)}$ – потенциалы, обусловленные взаимодействием набегающего, дифрагированного и вызванного колебаниями контура волнении [6].

С учетом нелинейных гидродинамических моментов второго порядка система дифференциальных уравнений бортовой качки будет иметь вид [1]:

$$(I_{xx}^{(1)}+\lambda_{44}^{(1)})\ddot{\theta}+\mu_{44}^{(1)}\dot{\theta}+\Delta\cdot GM\cdot\theta+\lambda_{24}^{(1)}\ddot{\eta}_g+\mu_{24}^{(1)}\dot{\eta}_g= =M_X^{(1)}e^{-i\omega t} \quad (14)$$

$$(I_{xx}^{(2)}+\lambda_{44}^{(2)})\ddot{\theta}+\mu_{44}^{(2)}\dot{\theta}+\Delta\cdot GM\cdot\theta+\lambda_{24}^{(2)}\ddot{\eta}_g+\mu_{24}^{(2)}\dot{\eta}_g= \quad (15)$$

$$=M_{X\Sigma}^{(2)}e^{-i2\omega t}$$

Суммарный нелинейный момент, действующий на судно в соответствии с методом малого параметра определяется из следующей суперпозиции:

$$\Sigma M_X^{(2)} = M_{X22}^{(2)} + M_{X33}^{(2)} + M_{X44}^{(2)} + M_{X77}^{(2)} + \\ + M_{X23}^{(2)} + M_{X34}^{(2)} + M_{X24}^{(2)} + \\ + M_{X2,0+7}^{(2)} + M_{X3,0+7}^{(2)} + M_{X4,0+7}^{(2)}. \quad (16)$$

где $M_{X22}^{(2)}, M_{X33}^{(2)}, M_{X44}^{(2)}$ – моменты, обусловленные изолированными ПГК, ВК и БК судна;

$M_{X77}^{(2)}$ – моменты, обусловленные дифракцией;

$M_{X23}^{(2)}, M_{X34}^{(2)}, M_{X24}^{(2)}$ – моменты, обусловленные совместными ПГК, ВК и БК судна;

$M_{X2,0+7}^{(2)}, M_{X3,0+7}^{(2)}, M_{X4,0+7}^{(2)}$ – моменты, обусловленные взаимодействием набегающего, дифрагированного и вызванного колебаниями контура волнении.

Составляющие (15) по отдельности определены в работах для выделенных шпангоутных сечений различной формы [3, 4, 5].

В настоящей статье восстанавливающий момент M_{right} рассчитывался по формуле:

$$M_{right} = \Delta \cdot GM_{av} \quad (17)$$

где Δ – водоизмещение по КВЛ, т;

GM_{av} – осредненная метацентрическая высота, м

Анализ результатов

Для расчета АЧХ бортовой качки судна первого и второго порядка на регулярном волнении разработаны две программы на основе [3], [4]:

Метода интегральных уравнений для жидкости бесконечной глубины (МГ);

Метода интегральных уравнений для жидкости ограниченной глубины (ММ) при заданном значении относительной глубины h/T;

Характеристики судов приведены в таблице 1.

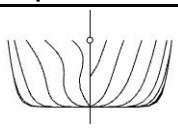
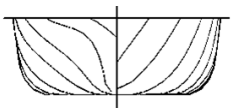
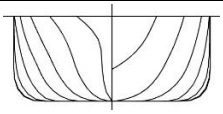
Расчетный диапазон частот возмущающего момента ω = 0,1 – 1.5, 1/с.

Влияние мелководья на величину коэффициентов демпфирования учитывалось домножением на эмпирический коэффициент [8]-[10]

$$\mu_{44}^{shal} = \mu_{\Sigma 44} \cdot \left(1 + \left[\frac{1}{h/T}\right]^2 - 0{,}4 \cdot \left[\frac{1}{h/T}\right]^3\right) \quad (17)$$

Таблица 1

Таблица основных характеристик судов

N/N	Проекция КОРПУС корма нос	Δ, т	L, м	B, м	T, м	C_b	LCB, м	y_G, м θ = 10°	y_G, м θ = 20°
1. Лесовоз «Павлин виноградов»		6395	122,0	18,84	7,39	0,673	-1,82	0,286	0,306
2. Ледокольно-транспортное «Норильск»		24100	160,0	24,00	8,50	0,704	-0,50	0,962	1,533
4. Балкер-контейнеровоз «Дмитрий Донской»		14140	154,9	22,86	9,88	0,746	-0,10	0,549	0,765

Примечания:
1. Δ – весовое водоизмещение, т;
2. *L* – длина судна по летнюю грузовую марку, м;
3. *B* – ширина судна по конструктивную ватерлинию, м;
4. *T* – осадка судна по конструктивную ватерлинию, м;
5. C_b – коэффициент общей полноты;
6. *LCB* – абсцисса центра величины судна от 10 теор. шп., м;
7. y_G – ордината центра тяжести при заданном начальном крене (θ), м.

На рис. 1, 2 приведены зависимости коэффициентов демпфирования первого (линейные) порядка, полученных на основании расчетов методами вычислительной гидродинамики по (6) для всех рассматриваемых судов при изменении начального крена судна (θ = 0°, 10°, 20°).

На рис. 3 приведены зависимости коэффициентов демпфирования второго (нелинейные) порядка.

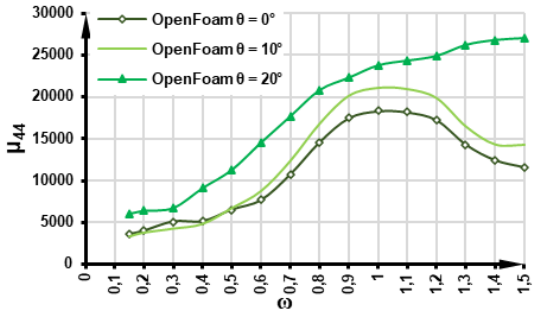


Рис. 1. Коэффициенты демпфирования первого порядка для лесовоза «Павлин Виноградов» в зависимости от начального крена судна

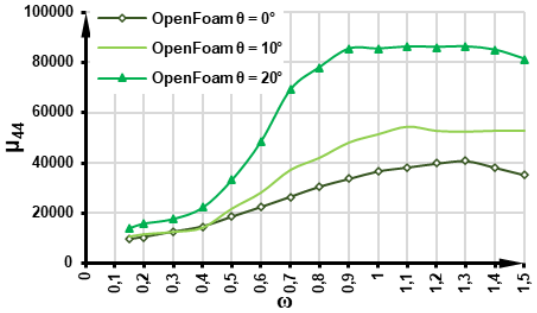


Рис. 2. Коэффициенты демпфирования первого порядка для судна «Норильск» в зависимости от начального крена судна

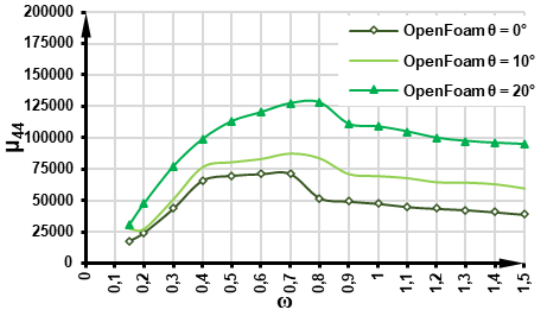


Рис. 3. АЧХ Коэффициенты демпфирования второго порядка для балкера «Дмитрий Донской в зависимости от начального крена судна

Из полученных результатов расчетов видно, что коэффициенты демпфирования возрастают на всем диапазоне частот при увеличении угла крена судна.

Коэффициенты демпфирования в задаче второго порядка определялись в той же постановке, но от удвоенной частоты возмущающего момента 2ω.

Полученные значения коэффициентов демпфирования (рис.1-3) использовались в дальнейших расчетах АЧХ первого и второго порядка бортовой качки судов для соответствующих углов начального крена.

В качестве апробации расчетного метода на рисунках 4, 5, 6 приведены наиболее показательные результаты расчетов АЧХ первого и второго порядка судов в равновесном положении, определенных на основании метода МГ.

Варьируемым параметром являлся способ определения демпфирования: OpenFOAM – по формуле (6), РД5.1003-80 – по формуле (7), Anfimov – по формуле (10).

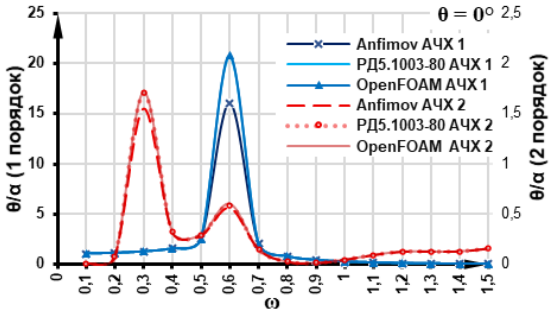


Рис. 4. АЧХ первого и второго порядка для лесовоза «Павлин Виноградов» в равновесном положении (МГ)

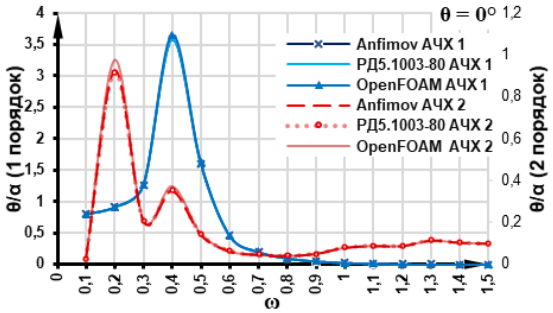


Рис. 5. АЧХ первого и второго порядка для судна «Норильск» в равновесном положении (МГ)

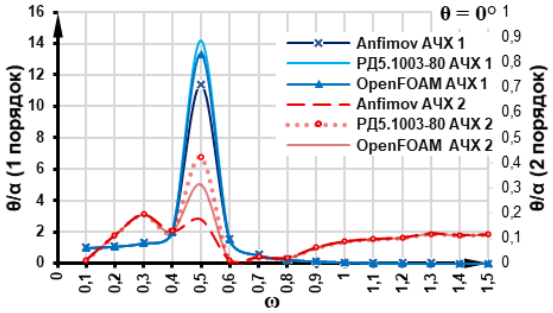


Рис. 6. АЧХ первого и второго порядка для балкера «Дмитрий Донской» в равновесном положении (МГ)

Сопоставление результатов расчетов АЧХ первого порядка при расположении судна лагом при разных способах расчета коэффициента демпфирования показало их хорошее согласование между собой на всем диапазоне расчетных частот (рис. 1, 2).

Зависимости АЧХ второго порядка также хорошо совпадают при различных способах определения коэффициента демпфирования.

На рис.7-12 приведены результаты сравнения АЧХ первого (1) и второго (2) порядка судов методами, разработанными для безграничной жидкости (МГ) и жидкости ограниченной глубины (ММ). Расчеты по методу ММ выполнялись при фиксированном значении относительной глубины h/T = 10.

При наличии начального крена судна использование эмпирических формул (7), (10), как было указано ранее, невозможно. В связи с этим при выполнении расчетов использовались только результаты расчетов коэффициента демпфирования в OpenFOAM.

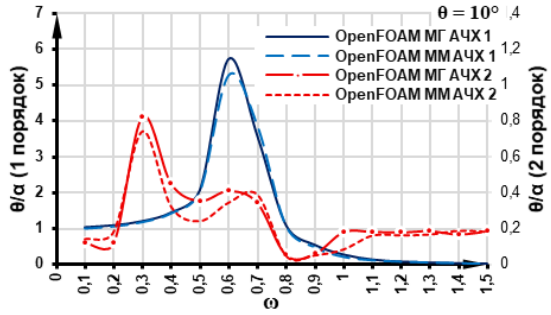


Рис. 7. Сравнение АЧХ первого и второго (2) порядка судна «Павлин Виноградов» для бесконечно-глубокой жидкости и жидкости ограниченной глубины (h/T = 10)

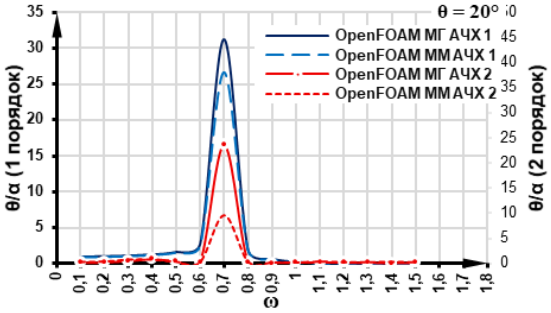


Рис. 8. Сравнение АЧХ первого (1) и второго (2) порядка судна «Павлин Виноградов» для бесконечно-глубокой жидкости и жидкости ограниченной глубины (h/T = 10)

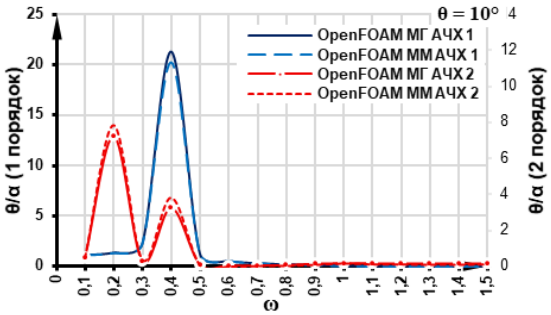


Рис. 9. Сравнение АЧХ первого (1) и второго (2) порядка судна «Норильск» для бесконечно-глубокой жидкости и жидкости ограниченной глубины (h/T = 10)

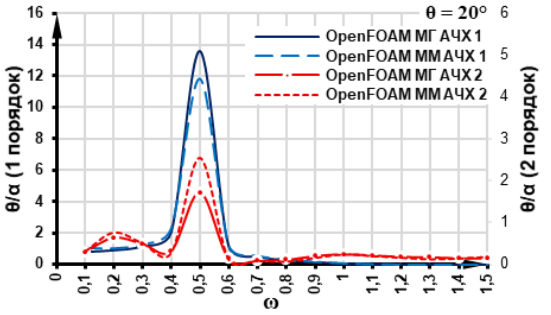


Рис. 10. Сравнение АЧХ первого (1) и второго (2) порядка судна «Норильск» для бесконечно-глубокой жидкости и жидкости ограниченной глубины (h/T = 10)

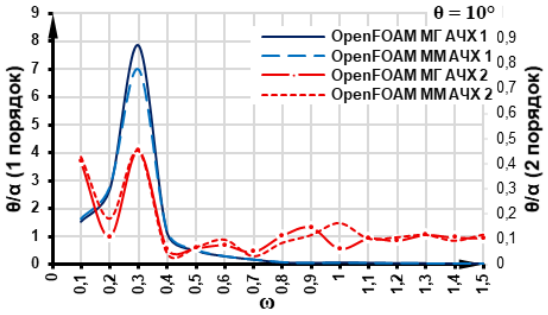


Рис. 11. Сравнение АЧХ первого (1) и второго (2) порядка судна «Дмитрий Донской» для бесконечно-глубокой жидкости и жидкости ограниченной глубины (h/T = 10)

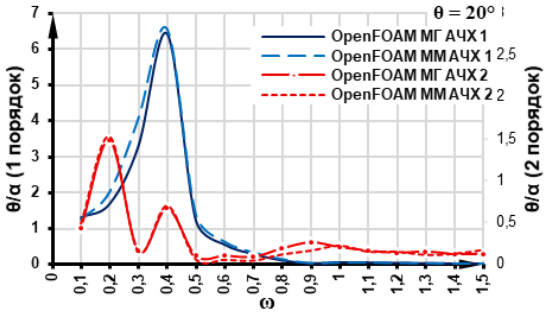


Рис. 12. Сравнение АЧХ первого (1) и второго (2) порядка судна «Дмитрий Донской» для бесконечно-глубокой жидкости и жидкости ограниченной глубины (h/T = 10)

Из графиков, представленных на рис.7-12 видно, что амплитудно-частотные характеристики бортовой качки первого и второго порядка, полученные для различных судов при разных значениях начальных углов крена по разным программам хорошо согласуются между собой.

В работе также проведено исследование влияния изменения относительной глубины на амплитудно-частотные характеристики бортовой качки второго порядка. Расчеты АЧХ проводились при изменении относительной глубины h/T = 2, 2.5, 5, 10. Характерные результаты приведены на рис.13-15.

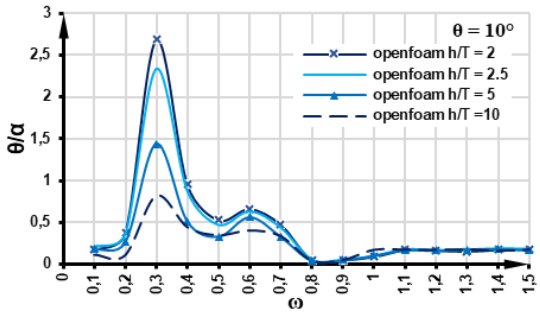


Рис. 13. Влияние относительной глубины на АЧХ второго порядка бортовой качки судна «Павлин Виноградов»

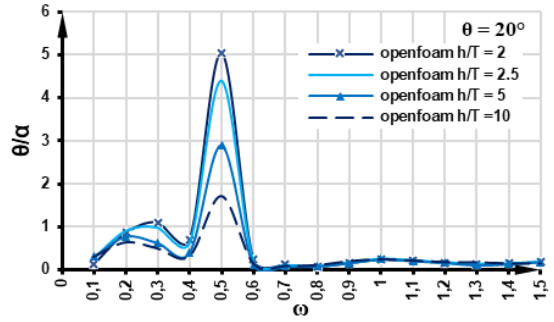


Рис. 14. Влияние относительной глубины на АЧХ второго порядка бортовой качки судна «Норильск»

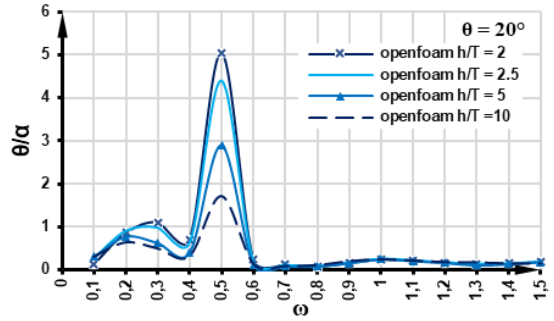


Рис. 15. Влияние относительной глубины на АЧХ второго порядка бортовой качки судна «Дмитрий Донской»

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- для всех приведенных АЧХ характерно увеличение амплитудных значений θ/α при уменьшении относительной глубины h/T независимо от значения угла крена. Например, для лесовоза «Павлин Виноградов» при частоте ω = 0.3 1/с амплитудно-частотная характеристика при h/T = 2 в 2,5 раза больше аналогичной амплитуды, возникающей при h/T = 5, и, в 3,5 раза больше, чем при относительной глубине h/T = 10 (рис.13).
- влияние изменения относительной глубины на амплитудно-частотные характеристики носит количественный характер и не изменяет положение резонансного пика по частоте.

Заключение

В настоящей статье изложен метод определения коэффициента демпфирования бортовой качки с учетом вязкости для накрененных судов на основании применения пакета OpenFOAM. С учетом полученных коэффициентов демпфирования проведены расчеты амплитудно-частотных характеристик бортовой качки первого и второго порядка накрененных судов как в бесконечно-глубокой жидкости, так и в условиях жидкости ограниченной глубины. При оценке амплитуд второго порядка учитывались нелинейные моменты.

В дальнейшем, при расчете АЧХ судов будет учтена нелинейность по восстанавливающему моменту через заданную диаграмму статической остойчивости $M_{\text{right}} = \Delta \cdot l(\theta)$, где $l(\theta)$ – плечо статической остойчивости, м.

Литература

1. Семенова В.Ю. (1999) Исследование и разработка программ расчета нелинейных гидродинамических сил, возникающих при колебаниях контуров корабельной формы на свободной поверхности жидкости. Диссертация на соискание уч. степени к.т.н. Библиотека СПбГМТУ.
2. Семенова В.Ю. (2005) Разработка метода расчета нелинейной качки судов. Дисс. на соискание уч. степени д.т.н. Библиотека СПбГМТУ.
3. Семенова В.Ю., Никитин Н.В., Динцер А.И. (2024), Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при поперечно-горизонтальных, вертикальных и бортовых колебаниях накрененных шпангоутных контуров, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 48—56.
4. Семенова В.Ю., Динцер А. И.(2024), Определение нелинейных сил второго порядка, действующих на накрененные шпангоутные контура при поперечных колебаниях в условиях мелководья. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 3 часть 1, С. 30—40. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.020.
5. Семенова В.Ю. А.И. Динцер (2024) Определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на накрененные шпангоутные контура Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 51 — 61.
6. Семенова В.Ю., Динцер А.И. (2024) Определение нелинейных сил, возникающих при взаимодействии поперечно-горизонтальных, вертикальных, бортовых колебаний и волнения на накрененные контуры. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 1, С. 69—78. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.007
7. Альбаев Д.А., А.И. Динцер (2025) Определение коэффициентов демпфирования бортовой качки для накрененных шпангоутных контуров численными методами / Д.А. Альбаев А.И. Динцер // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 75 — 81. — EDN FOCKTX.
8. Со Чжо Ту (2014) Разработка метода расчета нелинейных сил второго порядка, возникающих при качке судна на мелководье. Дисс. на соискание уч. степени к.т.н. Б-ка СПбГМТУ.
9. Со Чжо Ту, Семенова В.Ю. (2012) Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при поперечной качке контура на тихой воде в условиях мелководья. Морские интеллектуальные технологии, № 2(16), с.22-26.
10. Со Чжо Ту, Семенова В.Ю. (2013) Расчет нелинейной поперечной качки судна на мелководье. Морские интеллектуальные технологии, № 2(20), с.28-33.
11. Луговский В.В. Качка корабля: Учебник. Санкт-Петербург.: Изд.центр СПбГМТУ, 1999. 425 с.
12. Луговский В.В. Нелинейные задачи мореходности корабля Изд. «Судостроение», Ленинград, 1966, 236 с.
13. РД5.1003-80. Методика расчета качки водоизмещающих кораблей и судов. – Л., 1981. – 191 с.

14. Бородай И.К., Мореншильдт В.А., Виленский Г.В. и др. Прикладные задачи динамики судов на волнении. Л.: изд. «Судостроение». 1989, 264 с.
15. Альбаев Д.А., Фахурдинов Р.Р. Вычисление гидродинамических коэффициентов присоединённых масс и демпфирования при колебаниях шпангоутного контура численными методами, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 200—209. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.020.
16. Piehl H.P. Ship roll damping analysis: Doktors der Ingenieurswissenschaften / H.P. Piehl. — Universität Duisburg-Essen zur Erlangung, 2016.
17. Vugts, J. H. (1968) The hydrodynamic coefficients for swaying, heaving and rolling cylinders in a free surface. Report no. 194, Laboratorium Voor Scheepsbouwkunde, Technische Hogeschool Delft

References

1. Semenova V.Yu. (1999) Issledovanie i razrabotka programm rascheta nelineynykh gidrodinamicheskikh sil, voznikayushchikh pri kolebaniyakh konturov korabel'noy formy na svobodnoy poverkhnosti zhidkosti [Research and development of programs for calculating nonlinear hydrodynamic forces arises for oscillating ship’s frame sections on the free surface of a liquid]. Dissertatsiya na soiskanie uch. stepeni k.t.n. Biblioteka SPbGMTU.
2. Semenova V.Yu. (2005) Razrabotka metoda rascheta nelineynoy kachki sudov [Development of a method for calculating nonlinear motions of ships]. Diss. na soiskanie uch. stepeni d.t.n. Biblioteka SPbGMTU.
3. Viktoriya Yu. Semenova, Nikolai V. Nikitin, Aleksandr I. Dintser(2024), Calculation of second-order non-linear forces acting on heeled frame sections for sway, heave and ship roll motions. Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 48—56.
4. Viktoriya Yu. Semenova, Aleksandr I. Dintser (2024), Determination of second-order non-linear forces acting on heeled frame sections for sway, heave and ship roll motions in shallow waters. Marine intellectual technologies. 2024. № 3 part 1, P. 30—40. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.020.
5. Semenova V.Yu., Dintser A.I. (2024), Calculation of second-order non-linear diffraction forces acting on heeled frame sections. Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. 2024. No. 77. P. 51 — 61.
6. Viktoriya Yu. Semenova, Aleksandr I. Dintser (2024), Determination of second-order non-linear forces acting on heeled frame sections from the interaction of sway, heave and ship roll motions and waves. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 1, P. 69—78. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.007.
7. Al’baev D.A., Dintser A.I. Determinations of damping coefficients of roll for heeled frame sections using numerical methods. Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. 2025. No. 80. P. 75 — 81. EDN FOCKTX. (In Russ.)
8. So Chzho Tu (2014) Razrabotka metoda rascheta nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri kachke sudna na melkovod'e [Development of a method for calculating nonlinear second-order forces arising during the motions of a ship in shallow water]. Diss. na soiskanie uch. stepeni k.t.n. B-ka SPbGMTU.
9. So Chzho Tu, Semenova V.Yu. (2012) Opredelenie nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri poperechnoy kachke kontura na tikhoy vode v usloviyakh melkovod'ya [Determination of nonlinear second-order forces arising during lateral motions of the contour in calm water in shallow water conditions]. Morskie intellektual'-nye tekhnologii, No. 2(16), s.22-26.
10. So Chzho Tu, Semenova V.Yu. (2013) Raschet nelineynoy poperechnoy kachki sudna na melkovod'e [Calculation of nonlinear lateral motions of a vessel in shallow water]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, No. 2(20), s.28-33.
11. Lugovskiy V.V. Kachka korablya: Uchebnik. Sankt-Peterburg.: Izd.tsentr SPbGMTU, 1999. 425 s..
12. Lugovskiy V.V. Nelineynyye zadachi morekhodnosti korablya Izd. « Sudostroyeniye», Leningrad, 1966, 236 s.
13. RD5.1003-80. Metodika rascheta kachki vodoizmeshchayushchikh korabley i sudov. – L., 1981. – 191 s.
14. Boroday I.K., Morenshil'dt V.A., Vilenskiy G.V. i dr. (1989) Prikladnye zadachi dinamiki sudov na volnenii. L.: Sudostroenie, 264 s.
15. Al′bayev D.A., Fakhurdinov R.R. Vychisleniye gidrodinamicheskikh koeffitsiyentov prisoyedinënnykh mass i dempfirovaniya pri kolebaniyakh shpangoutnogo kontura chislennymi metodami, Morskiye intellektual′nyye tekhnologii. 2023. № 3 chast′ 1, S. 200—209. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.020.
16. Piehl H.P. Ship roll damping analysis: Doktors der Ingenieurswissenschaften / H.P. Piehl. — Universität Duisburg-Essen zur Erlangung, 2016.
17. Vugts, J. H. (1968) The hydrodynamic coefficients for swaying, heaving and rolling cylinders in a free surface. Report no. 194, Laboratorium Voor Scheepsbouwkunde, Technische Hogeschool Delft

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

Семенова Виктория Юрьевна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой теории корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: sem_viktoria@mail.ru

Динцер Александр Ильич, ассистент кафедры теории корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: cassraps19@gmail.com

Viktoriya Yu. Semenova, Dr. Sci. (Eng.), Professor, the head of department of theory of the ship, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: sem_viktoria@mail.ru

Aleksandr I. Dintser, assistant of department of theory of the ship, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: cassraps19@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 02.08.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.08.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 11.08.2026.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

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

Научная статья
УДК 629.12.002.8
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.035

Матричный метод интегральной оценки воздействия на окружающую среду работ по подъему и утилизации судна

Наумов В.С.[1] nauvs@mail.ru**, Кочнева И.Б.**[1] iringre@mail.ru, **Кочнев Ю.А.**[1] tmnnkoch@mail.ru
[1]Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. Затонувшие и брошенные суда представляют собой источник загрязнения окружающей среды, а также создают угрозу безопасности судоходства. В рамках национального проекта «Экологическое благополучие и федеральных программ предусмотрены мероприятия по подъему и утилизации таких объектов. Однако практическая реализация этих работ требует обоснованной оценки их воздействия на окружающую среду. Целью работы является обоснование применения матричного метода для интегральной оценки воздействия на окружающую среду при подъеме и утилизации затонувших судов, а также разработка соответствующей матрицы с детализацией видов деятельности и компонентов окружающей среды. Научная новизна заключается в адаптации классического матричного метода к специфике судоподъемных и утилизационных работ, включая выделение 13 видов воздействия и их оценку по 8 компонентам окружающей среды; учет двух альтернативных сценариев утилизации. Предложенная матрица позволяет системно оценить воздействие каждого этапа работ, выявить наиболее критичные экологические риски. Включение альтернативных сценариев утилизации обеспечивает объективность при выборе экологически предпочтительного варианта. Разработанная матрица может служить основой для создания информационно-технологической платформы «Подъем и утилизация судов», включающей модуль экологического мониторинга и обращения с отходами.
Ключевые слова: экологическая безопасность, воздействие на окружающую среду, судно, загрязнение, охрана окружающей среды, оценка воздействия, матричный метод
Финансирование: Исследование выполнено в рамках реализации государственного задания по научной деятельности по направлению «Речные магистрали: техносферная безопасность, разработка мероприятий по извлечению затонувшего имущества на ВВП.
Для цитирования: Наумов В.С., Кочнева И.Б., Кочнев Ю.А. Матричный метод интегральной оценки воздействия на окружающую среду работ по подъему и утилизации судна, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 95—104. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.035

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.035

Matrix method for integrated environmental impact assessment of ship lifting and recycling operations

Victor S. Naumov[1] nauvs@mail.ru**, Irina B. Kochneva**[1] iringre@mail.ru, **Yury A. Kochnev**[1] tmnnkoch@mail.ru
[1]Volga State University of Water Transport, Russian Federation

Abstract. Sunken and abandoned ships represent a source of environmental pollution and also pose a threat to navigation safety. Within the framework of the national project "Environmental Well-being" and federal programs, measures are envisaged for the lifting and recycling of such objects. However, the practical implementation of these works requires a substantiated assessment of their environmental impact. The aim of this work is to justify the application of the matrix method for the integrated environmental impact assessment of sunken ship lifting and recycling operations, as well as to develop an appropriate matrix detailing the types of activities and environmental components. The scientific novelty lies in the adaptation of the classical matrix method to the specificities of ship lifting and recycling operations, including the identification of 13 types of impacts and their assessment across 8 environmental components, as well as the consideration of two alternative recycling scenarios. The proposed matrix allows for a systematic assessment of the impact of each stage of work and the identification of the most critical environmental risks. The inclusion of alternative recycling scenarios ensures objectivity in selecting the environmentally preferable option. The developed matrix can serve as a basis for creating the information technology platform "Ship Lifting and Recycling," which includes an environmental monitoring and waste management module.
Keywords: environmental safety, environmental impact, vessel, pollution, environmental protection, impact assessment, matrix method

© Наумов В.С., Кочнева И.Б., Кочнев Ю.А. 2026

For citation: Victor S. Naumov, Irina B. Kochneva., Yury A. Kochnev. Matrix method for integrated environmental impact assessment of ship lifting and recycling operations. Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 95—104. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.035

Введение

Одним из источников загрязнения гидросферы являются суда, брошенные на акватории, и находящиеся в затопленном/полузатопленном состоянии или обсушены на берегу.

В настоящее время национальным проектом и федеральными программами предусмотрено проведение работ по подъему и утилизации судов [1], [2], [3]. Так же ведутся работы по судебным решениям, обязывающим собственников, районные администрации поднимать и утилизировать суда.

Утилизация представляет собой завершающую стадию жизненного цикла судна, инициируемую после прекращения его эксплуатации. Технологически процесс может реализовываться на специализированных предприятиях судостроительного и судоремонтного профиля. Однако при нахождении судна на акватории в состоянии потери плавучести и герметичности корпуса, исключающем возможность безопасной транспортировки, возникает необходимость проведения береговой разделки, предваряемой подъемом объекта. Независимо от избранного способа утилизации, осуществление деятельности должно базироваться на строгом соблюдении природоохранных требований [4], методологической основой которых служит оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС).

Для обозначенных работ по подъему и утилизации судов должна проводиться оценка воздействия на окружающую среду [4], которая будет основанием для разработки обосновывающей документации по планируемым работам подъема и утилизации судна.

Результаты оценки воздействия на окружающую среду должны содержать информацию о видах и масштабах воздействия на окружающую среду планируемого подъема и утилизации судна, альтернативных вариантов реализации этих работ (выбор технологий подъема и утилизации, места утилизации).

Оценка воздействия на окружающую среду работ по подъему и утилизации судов

Для выбора наиболее подходящего метода оценки воздействия на окружающую среду для проекта подъема и утилизации судна на берегу, который обеспечит всестороннюю и объективную оценку его потенциального воздействия на окружающую среду, систематизируем известные методики оценки воздействия на окружающую среду.

Рассматривая современную методологию ОВОС, можно выделить комплекс взаимодополняющих подходов. Среди них особое место занимают методы идентификации и анализа воздействий, включая матричные методы. Матрица Леопольда представляет собой классический инструмент, устанавливающий корреляционные связи между элементами проекта и компонентами природной среды через табличное представление данных, что позволяет осуществлять качественную оценку значимости воздействий. Наряду с этим существуют модифицированные матричные подходы - усовершенствованные версии базовой методики, включающие весовые коэффициенты, многоуровневые системы оценки и цветовую дифференциацию для повышения репрезентативности анализа.

Переходя к другим методам, следует отметить чек-листы (контрольные списки) как стандартизированные перечни контрольных вопросов, обеспечивающие системный скрининг потенциальных воздействий. Не менее важны сетевые методы, в частности метод сетевых диаграмм, который визуализирует причинно-следственные связи между проектными решениями и элементами окружающей среды, обеспечивая учет косвенных и кумулятивных эффектов. Заслуживают внимания и картографические методы, основанные на геоинформационном наложении слоев, отражающих различные экологические параметры территории для идентификации зон повышенной экологической чувствительности.

Говоря о методах прогнозирования и моделирования, необходимо выделить атмосферное моделирование рассеивания загрязняющих веществ, позволяющее прогнозировать пространственное распределение примесей. Существенное значение имеют гидрологическое и гидродинамическое моделирование, оценивающее трансформацию режимных характеристик водных объектов, а также геохимическое моделирование, анализирующее миграцию химических элементов в системе "почва-вода". Наряду с этим применяется экологическое моделирование для прогнозирования изменений в структуре и функциях экосистем и акустическое моделирование для расчета полей шумового воздействия.

Из методов социально-экономической оценки, следует выделить анализ "затраты-выгоды" как инструмент сопоставительной оценки экономической эффективности и экологических последствий. Значительную роль играет оценка рисков для здоровья населения, определяющая потенциальные медико-демографические последствия, а также социологические исследования, выявляющие общественные предпочтения и восприятие экологических рисков. Отдельного внимания заслуживает анализ воздействия на объекты культурного наследия, оценивающий сохранность историко-археологических ценностей.

В контексте сравнительных и риск-ориентированных методов необходимо отметить многокритериальный анализ, обеспечивающий комплексное сравнение альтернативных решений, и анализ жизненного цикла, оценивающий кумулятивный экологический след. Наряду с этим применяются методы дерева событий и FMEA-анализа для идентификации и ранжирования технологических рисков, а также оценка уязвимости экосистем, анализирующая устойчивость природных комплексов к антропогенным нагрузкам.

Среди специализированных методов мониторинга особое место занимают биоиндикационные методы, использующие организмы-индикаторы для оценки качества среды. Современные подходы включают

дистанционный мониторинг, обеспечивающий получение пространственных данных средствами аэрокосмической съемки, и ГИС-технологии, позволяющие проводить интеграционный анализ гетерогенных экологических данных.

Для целенаправленного применения методов ОВОС целесообразно рассматривать их классификацию по ключевым параметрам. По стадийности оценки различают скрининговые методы (чек-листы, базовые матрицы), детальные методы (моделирование, количественный анализ) и мониторинговые методы (биоиндикация, дистанционный контроль). С точки зрения объекта воздействия методы разделяются на оценивающие абиотические компоненты (физико-химические модели), биотические комплексы (экологическое моделирование) и социо-экономические системы (социологические исследования).

Если рассматривать степень формализации, то методы можно разделить на качественные (экспертные оценки), количественные (математические модели) и смешанные (весовые коэффициенты, балльные системы). По способу визуализации выделяют табличные (матричные методы), графические (картографические модели) и аналитические (текстовые заключения) подходы. С учетом неопределенностей методы классифицируют на детерминированные (точные параметры), вероятностные (статистические распределения) и сценарные (альтернативные варианты). Наконец, по характеру воздействий различают методы оценки прямых эффектов (непосредственное влияние) и косвенных и кумулятивных эффектов (цепные реакции).

В таблице 1 представлено сравнение методик оценки воздействия на окружающую среду по ряду параметров.

Таблица 1

Сравнение по параметрам методик оценки воздействия на окружающую среду

Параметр систематизации	Матрица Леопольда	Методы прогнозирования	Методы биоиндикации	Анализ видов и последствий отказов
Этап проведения оценки воздействия на окружающую среду	Скрининг, детальная оценка	Детальная оценка	Мониторинг, оценка текущего состояния	Оценка рисков, планирование мер предотвращения воздействия
Тип воздействия	Все типы (физическое, биологическое, социально-экономическое)	Физическое	Биологическое	Все типы (потенциальные риски отказов)
Степень сложности и детализации	Качественный, полуколичественный	Количественный	Качественный, полуколичественный	Качественный, полуколичественный
Способ представления результатов	Матрица	Графики, карты, таблицы	Карты, таблицы	Таблицы
Область применения	Широкий спектр проектов	Проекты с выбросами загрязняющих веществ	Оценка качества воды, воздуха, почвы, мониторинг загрязнения	Оценка риска в промышленных процессах, технологиях, оборудовании
Учет неопределенности	Низкий (в базовом варианте)	Может быть высоким (зависит от использованной модели и данных)	Зависит от чувствительности биоиндикаторов, изменчивости среды	Умеренный (оценка вероятности и тяжести последствий)
Прямые/ косвенные/ кумулятивные воздействия	Прямые и косвенные	Прямые и косвенные	Прямые и косвенные	Прямые (последствия отказов), косвенные (влияние на окружающую среду)

Подъем и утилизация судов сложный технологический процесс, включающий подготовительные работы (топографическая съемка, водолазное обследование), подъем, разделку и утилизацию. Если планируется утилизацию производить не на месте подъема судна, то потребуется транспортировка к запланированному для этого предприятию.

Считаем, что применение матрицы Леопольда для оценки воздействия на окружающую среду при подъеме и утилизации затонувших судов практически целесообразно и позволяет системно оценить воздействие каждого вида деятельности на каждый компонент окружающей среды, выявив наиболее значимые взаимосвязи. Использование данного метода будет соответствовать требованиям нормативной базы [4], обеспечивая комплексность оценки, обоснованность выводов, прозрачность процедуры оценки, учет общественного мнения (наглядность представления результатов).

Также метод успешно апробирован в Российской Федерации для оценки воздействия разработки месторождений полезных ископаемых, мелиоративных проектов, реконструкции гидротехнических сооружений [5] – [7]. Это подтверждает его адаптивность и эффективность для различных видов хозяйственной деятельности, включая подъем и утилизацию судов.

На основе анализа материалов [5] – [14] разработана матрица для оценки воздействия работ по подъему и утилизации затонувших судов. Матрица структурирована по классическому принципу: по вертикали перечислены виды деятельности (воздействия), а по горизонтали – компоненты окружающей среды, на которые это воздействие оказывается (табл.2).

В качестве видов воздействия были выбраны подготовительные работы, к которым можно отнести:

– инженерные изыскания и обследование объекта (гидрографические работы – топографическая съемка дна и береговой полосы с определением точных координат судна, глубины, рельефа дна; водолазное обследование – визуальный осмотр корпуса, оценка целостности конструкций, положение судна на грунте, степени заиления: инструментальные измерения – определение остаточных толщин корпуса, характера и мощности данных отложений;

– лабораторные исследования (отбор проб – воды, донных отложений, грунтов береговой полосы для химического анализа; аналитический контроль – определение концентраций загрязняющих веществ (нефтепродукты, тяжелые металлы) в отобранных пробах);

– организационно-подготовительные мероприятия (ограждение акватории работ – установка боновых заграждений для предотвращения распространения загрязнений; разметка территории – выделение зон повышенной опасности, мест стоянки техники).

Таким образом, водолазные работы вызывают локальное взмучивание донных отложений, работа моторных лодок при съемке создает микропротечки горючесмазочных материалов, что окажет влияние на гидросферу.

На фауну будут воздействовать шум эхолотов и движение плавсредств, нарушая естественное поведение рыб, а водолазы механически повреждают бентосные организмы.

Устройство временных стоянок на берегу, вытаптывание прибрежной растительности влияют на ландшафт. Оценить данные воздействия можно как слабое, а характер воздействия – среднесрочный.

Земляные работы при подъеме судна включают размыв грунта вокруг судна для его освобождения (гидроразмыв), устройство подъездных путей и рабочих площадок на берегу для размещения тяжелой техники (кранов, бульдозеров), планировку береговой полосы для организации временного стапеля или площадки для утилизации.

При этом воздействие на литосферу связано с нарушением структуры почвы, формированием искусственных насыпей, котлованов, изменением уклона при устройстве рабочих площадок и подъездных путей. Проведение этих работ приведет к массовому поступлению взвешенных веществ (повышению мутности), что нарушает фотосинтез водных растений и забивает жабры рыб – влияние на поверхностные воды. Нарушение естественного гидрологического режима территории, при котором может произойти подпор или, наоборот, осушение горизонтов, окажет влияние на грунтовые воды. Воздействие на атмосферу связано с пылеобразованием при работе техники и перемещении грунтов. Пыль будет содержать не только частицы почвы, но и адсорбированные на них загрязняющие вещества (тяжелые металлы, остатки нефтепродуктов). Проведение земляных работ сопровождается изменением ландшафта – происходит формирование техногенного рельефа, который может сохраняться долгие годы даже после рекультивации; визуальное нарушение естественного берегового пейзажа. Влияние на флору и фауну связано с прямым уничтожением местообитаний (вырубка прибрежной растительности, уничтожение нерестилищ), для наземных видов – фрагментация среды обитания.

Земляные работы в прибрежной зоне – это вмешательство в область активного влагообмена. Они могут спровоцировать вынос в водоток загрязняющих веществ, накопленных в почве и донных отложениях, подток загрязненных грунтовых вод к поверхности. Это приводит к возникновению риска вторичного загрязнения.

Таким образом, последствия земляных работ носят среднесрочный и даже долгосрочный характер, так как для восстановления нарушенного почвенного покрова и береговой экосистемы требуются годы, даже при проведении рекультивации.

Подъем судна – это кульминационная стадия, где риски реализации негативных воздействий максимальны.

При отрыве корпуса от дна происходит одномоментное взмучивание донных отложений, которые аккумулировали тяжелые металлы, нефтепродукты и другие загрязняющие вещества с корпуса судна [15]. Концентрации загрязняющих веществ в водной толще могут кратковременно повышаться на несколько порядков, вызывая острую токсикологическую реакцию у гидробионтов (гибель зоопланктона, отравление рыб).

Физическое воздействие на донные экосистемы приведет к уничтожению бентосных сообществ, успевших сформироваться на корпусе судна и под ним за время его нахождения на дне, а также к изменению гидродинамики и морфологии дна на участке подъема.

При подъеме судна существует высокий риск аварийных ситуаций из-за обрыва тросов, стропов, что приведет к падению судна обратно на дно, что в свою очередь, вызовет не только ударную волну, но и разгерметизацию оставшихся конструкций и емкостей. Разгерметизация спровоцирует неконтролируемый выброс остатков топлива, масел и других технических жидкостей в акваторию [16].

Если поднятое судно планируют утилизировать на предприятии, то потребуется транспортировка судна к месту утилизации, которая создает самостоятельные риски, отличные от этапов подъема и утилизации.

При транспортировке поднятого судна существует постоянный риск разгерметизации, так как поднятое судно испытывает динамические нагрузки при буксировке. Это создает угрозу вытекания остаточных жидкостей (топлива, масел) из цистерн и систем.

Движение плавсредств (буксира, понтонов с судном) создает волны. Волны размывают берега (воздействие на литосферу и ландшафт), поднимают со дна взвешенные вещества (воздействие на гидросферу), ухудшают условия нереста и нагула рыбы у береговой линии (воздействие на фауну).

Транспортировка вызывает шумовое и вибрационное воздействие, так как от работы двигателей буксиров и движения крупного объекта создают подводный шум. Это нарушает коммуникацию, ориентацию и поведение

гидробионтов (рыб, мелких млекопитающих) на всем пути следования [17].

При транспортировке существует вероятность столкновения с другими судами или объектами инфраструктуры, что может привести к аварийной ситуации с экологическими последствиями. Транспортировка крупногабаритного объекта может временно нарушать работу водного транспорта на участке пути (социально-экономическое воздействие).

В отличие от других этапов воздействие при транспортировке распространяется не на точечную локацию, а на линейный маршрут следования. Это означает, что потенциальному влиянию подвергается значительно большая площадь акватории и береговой полосы.

Включение транспортировки позволит провести сравнительную оценку двух стратегий: транспортировку на специализированное предприятие для утилизации там (сопровождается рисками транспортировки, но позволяет минимизировать воздействие от утилизации) или утилизацию на месте (исключает риски транспортировки, но создает значительное локальное воздействие от разделки).

Разделка и утилизация судна на месте представляет собой качественно иной уровень комплексного воздействия на все компоненты окружающей среды, поскольку является самым нагрузочным и опасным этапом, если проводится на берегу.

Воздействие на атмосферу связано с образованием прямых выбросов от газовой резки корпуса, которые приводят к эмиссии взвешенных частиц, оксидов азота и углерода, а также возможных диоксинов при сгорании старых красок и изоляции [18]. Важно отметить, что в полевых условиях отсутствуют системы очистки, что делает невозможным применение эффективных газоочистных установок, вследствие чего загрязняющие вещества беспрепятственно рассеиваются на прилегающую территорию и акваторию.

Переходя к воздействию на литосферу и почву, следует указать на значительное загрязнение грунта окалиной, каплями металла и остатками масел и красок, что приводит к накоплению тяжелых металлов и долговременному выводу земель из хозяйственного оборота. Кроме того, происходит физическое нарушение почвенного покрова при устройстве временной площадки для разделки.

Рассматривая влияние на гидросферу, необходимо выделить два основных фактора: во-первых, это стоки с площадки, когда атмосферные осадки вымывают загрязняющие вещества в водный объект, и, во-вторых, риск прямого попадания отходов в воду. Одновременно с этим возникает серьезная проблема с образование отходов, где наблюдается неконтролируемое обращение с различными категориями отходов и высокий риск создания несанкционированных свалок при временном складировании на берегу.

Разделку и утилизацию судна возможно проводить и на специализированном предприятии. Следует отметить, что ключевым преимуществом этого варианта является наличие стационарных систем очистки на предприятии. В отличие от полевых условий на специализированных площадках эффективность газоочистки достигает 92-96% благодаря использованию рукавных фильтров и скрубберов [19]. Это кардинальным образом снижает воздействие на атмосферу, поскольку концентрации взвешенных частиц, оксидов азота и углерода поддерживаются в пределах нормативов предельно допустимых концентраций.

Что касается обращения с отходами, то здесь наблюдается системный подход к их сепарации и утилизации. На предприятии обеспечивается строгое разделение металлолома, опасных отходов и вторичных материалов, что исключает риск образования несанкционированных свалок и загрязнения почвы. Особое внимание должно уделяться обезвреживанию особо опасных веществ – асбестосодержащих материалов, отработанных масел и лакокрасочных отходов, которые передаются лицензированным организациям для профессионального уничтожения. Говоря о воздействии на водные ресурсы, необходимо подчеркнуть, что стационарные очистные сооружения предприятия предотвращают попадание загрязненных стоков в водные объекты.

Утилизация судна – это процесс, в результате которого все масса объекта (судна) переходит в категорию отходов. При этом образуются разнородные отходы (металл, опасные вещества, строительный мусор), каждый вид отхода требует особых условий обращения, несоблюдение которых создает кумулятивное воздействие на среду. Образующиеся отходы относятся к разным классам, определяющим степень воздействия на окружающую среду [20]. Черный металлолом, относящийся к 5 классу, относительно безопасен. Отходы 1 – 4 классов – краски, содержащие свинец и медь, асбест, отработанные масла, стекловата – оказывают токсическое, канцерогенное воздействие. Образовавшиеся отходы требуют размещения на территории, что может привести к загрязнению почв тяжелыми металлами, нефтепродуктами – воздействие на литосферу. Воздействие на гидросферу связано с существующим риском фильтрации загрязняющих веществ в грунтовые и поверхностные воды. Также размещение отходов приводит к деградации территории, визуальному загрязнению.

Отходы являются источником длительного и масштабного воздействия, так как десятилетиями сохраняют опасность (тяжелые металлы, нефтепродукты), могут мигрировать в окружающую среду (фильтрация в грунтовые воды, разнос ветром).

Работа технологического оборудования (плавкраны, буксиры, компрессоры, автотранспорт) создает устойчивый комплекс загрязнений. Этот вид воздействия имеет постоянный характер на протяжении всех этапов работ, формирует фоновое техногенное давление на экосистемы, требует отдельных мер по снижению выбросов и сбросов. Таким образом, «Загрязнение от работы техники» представляет собой сквозной экологический аспект.

Аварийные разливы горючесмазочных материалов при заправке и эксплуатации техники, постоянные микропротечки масел и гидравлических жидкостей, возможный сброс льяльных вод плавсредствами без очистки оказывают воздействие

на гидросферу. Воздействие на атмосферу формируют выбросы отработавших газов двигателей (NO_x, SO_x, сажа), пылеобразование при работе автотранспорта на грунтовых дорогах [21]. Это может привести к локальному ухудшению качества воздуха в зоне проведения работ. Влияние на литосферу происходит от загрязнения почв нефтепродуктами при стоянках и заправке техники, уплотнения грунта тяжелой техникой, нарушения почвенной структуры, аккумуляции тяжелых металлов от износа шин.

При подъеме судна и сопутствующих работах происходит одномоментное высвобождение загрязняющих веществ, аккумулированных в донных отложениях и самом корпусе судна. Это вызывает вторичное загрязнение, которое принципиально отличается от первичных выбросов (например, от работы техники), поскольку связано с мобилизацией уже накопленных в окружающей среде загрязняющих веществ, создающее пиковую нагрузку на экосистему.

Переход в водную толщу тяжелых металлов из донных отложений при взмучивании приводит к кратковременному, но катастрофическому по масштабам загрязнению. Взвешенные вещества вызывают механическое повреждение жабр рыб и фильтрующего аппарата беспозвоночных. Одновременно переход токсичных веществ в биодоступную форму приводит к острым токсикологическим эффектам, вплоть до массовой гибели зоопланктона и бентосных организмов на значительной акватории. Последствия вторичного загрязнения носят не только моментальный характер (гибель гидробионтов), но и долгосрочный, так как тяжелые металлы, попавшие в водную толщу, снова осаждаются, но уже на новых территориях, расширяя ареал загрязнения, происходит вторичное заражение пищевых цепей.

Шум и вибрация от работы техники представляют собой форму физического загрязнения окружающей среды, которая не связана с химическими выбросами, но оказывает значимое влияние на биоту и человека. Это воздействие носит постоянный характер на протяжении ключевых этапов работ (подготовка, подъем, разделка).

Для водных экосистем шум является одним из наиболее значимых факторов беспокойства. Происходят нарушение коммуникации и ориентации гидробионтов (шум от работающей техники маскирует естественные звуки), физиологические повреждения (интенсивный низкочастотный шум может вызывать повреждение плавательного пузыря и внутренних органов рыб); изменение поведения (наблюдается избегание зоны работ, нарушение миграционных путей, прекращение нагула) [17]. Наземные животные, особенно птицы и млекопитающие, покидают места обитания в зоне активных работ.

Вибрация, передающаяся через грунт и водную среду, оказывает дополнительное воздействие и может вызывать уплотнение грунтов, изменение несущей способности оснований, возможны повреждения прибрежных построек и инфраструктуры, способствует дополнительному взмучиванию донных отложений.

Таким образом, на основе рассмотренных видов деятельности и возникающих воздействий разработана матрица для оценки воздействия работ по подъему и утилизации судов (таблица 2).

Таблица 2

Матрица для оценки воздействия работ по подъему и утилизации затонувших судов

Виды воздействия (Виды деятельности)	Литосфера (Почва, грунты)	Гидросфера (Поверхностные воды)	Гидросфера (Грунтовые воды)	Атмосфера (Качество воздуха)	Флора	Фауна (в т.ч. ихтиофауна)	Ландшафт / Береговая зона	Социально-экономическая сфера (Судоходство, рекреация)
1. Подготови-тельные работы	1 (С)	1 (С)	0	0	0	1 (С)	1 (С)	0
2. Земляные работы	2 (С)	2 (С)	1 (С)	2 (С)	1 (С)	2 (С)	2 (С)	1 (С)
3. Подъем судна	1 (С)	3 (К)	0	1 (С)	0	3 (К)	1 (С)	2 (К)
4. Транспортировка судна	0	1 (С)	0	1 (С)	0	1 (С)	0	1 (К)
5. Разделка на месте	2 (К)	2 (К)	1 (К)	2 (К)	2 (К)	2 (К)	2 (К)	2 (К)
6. Разделка на предприятии	1 (К)	1 (К)	1 (К)	2 (К)	1 (К)	1 (К)	1 (К)	1 (К)
7. Образование и размещение отходов	2 (К)	2 (К)	2 (К)	1 (К)	1 (К)	1 (К)	2 (К)	1 (К)

Виды воздействия (Виды деятельности)	Литосфера (Почва, грунты)	Гидросфера (Поверхностные воды)	Гидросфера (Грунтовые воды)	Атмосфера (Качество воздуха)	Флора	Фауна (в т.ч. ихтиофауна)	Ландшафт / Береговая зона	Социально-экономическая сфера (Судоходство, рекреация)
8. Загрязнение от работы техники	2 (К)	3 (К)	1 (К)	2 (К)	1 (К)	2 (К)	1 (К)	1 (К)
9. Вторичное загрязнение	1 (С)	3 (К)	1 (К)	1 (С)	1 (С)	3 (К)	1 (С)	2 (К)
10. Шумовое и вибрационное воздействие	0	1 (С)	0	1 (С)	0	2 (С)	0	2 (С)
11. Изменение русловых процессов	2 (Д)	2 (Д)	1 (Д)	0	1 (Д)	2 (Д)	2 (Д)	2 (Д)
12. Риск аварийных ситуаций (разрыв троса, разгерметизация)	2 (К)	3 (К)	1 (К)	1 (К)	1 (К)	3 (К)	1 (К)	3 (К)
13. Рекультивация и восстановление территории	+2 (Б)	+1 (Б)	0	0	+2 (Б)	+1 (Б)	+2 (Б)	+2 (Б)

Условные обозначения:

Шкала оценки негативного воздействия: 0 – Отсутствует; 1 – Слабое; 2 – Среднее; 3 – Сильное.

Характер воздействия: К – Краткосрочное; С – Среднесрочное; Д – Долгосрочное; Б – Благоприятное.

Шкала оценки позитивного воздействия: +1 – Слабое положительное; +2 – Среднее положительное; +3 – Сильное положительное.

Заключение

Включение в матрицу для оценки воздействия на окружающую среду видов работ, указанных в таблице 2, обеспечивают полноту и непрерывность экологической оценки на всех стадиях проекта от подготовительных работ до окончательной утилизации.

Оценки воздействия на окружающую среду матричным методом позволяет сфокусировать внимание на главных точках экологического риска, спланировать максимум природоохранных усилий именно там, где они наиболее критичны, а также дать адекватную интегральную оценку воздействия всего проекта на окружающую среду.

Так, оценка показала высокие баллы (3) негативного воздействия при подъеме. Эта оценка говорит о необходимости повышенного внимания к обеспечению экологической безопасности путем количественной оценки вероятности и последствий аварийных ситуаций, разработки соответствующих мер безопасности (например, расчет запаса прочности такелажа, план ликвидации аварийных разливов нефти), обоснования необходимости специального оборудования (боновые заграждения, сорбенты, системы постоянного мониторинга качества воды в процессе подъема).

В матрице выделены виды деятельности, такие как загрязнение от работы техники, шумовое и вибрационное воздействие, которые представляют собой сквозной экологический аспект, оказывающий воздействие на протяжении ключевых этапов работ (подготовка, подъем, разделка) и требует отдельных мер по снижению.

Для судна, находящегося на берегу или затопленном/полузатопленном состоянии возможны два сценария утилизации: либо на месте, либо транспортировку судна к предприятию по утилизации. В разработанной матрице предложено оценить отдельно воздействие работ по транспортировке судна, разделку на месте и разделку на предприятии.

Считаем, что это позволит превратить матрицу из формального документа в рабочий инструмент для принятия решений, позволяя количественно доказать экологическую предпочтительность утилизации на предприятии, спрогнозировать и минимизировать ущерб при вынужденной утилизации на месте, а также учесть все сценарии реализации проекта в соответствии с принципами полноты и достоверности проводимой оценки воздействия на окружающую среду.

Данные наработки по оценке воздействия на окружающую среду планируется использовать в разрабатываемой Волжским государственным университетом водного транспорта информационно-технологической платформе «Подъем и утилизация судов» для плавсредств внутреннего и смешанного (река-море) плавания.

В платформу предполагается включить модуль экологического мониторинга и обращения с отходами. Основное назначение модуля заключается в систематизации, хранении и анализе информации о воздействии на окружающую среду на всех этапах технологического процесса – от момента обследования затонувшего судна до завершения его утилизации. Модуль позволит осуществлять непрерывный контроль за соблюдением природоохранных норм и своевременно выявлять потенциальные экологические риски.

Литература

1. Национальный проект «Экологическое благополучие». URL: http://government.ru/rugovclassifier/919/about/ (дата обращения 05.05.2026).
2. Паспорт федерального проекта «Генеральная уборка». URL: file:///C:/Users/%D0%98/Downloads/177861.pdf (дата обращения 05.05.2026).
3. Паспорт федерального проекта «Оздоровление Волги». URL: https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/1e2/FP_Ozdorovlenie_Volgi_20.12.2018.pdf (дата обращения 05.05.2026).
4. Об охране окружающей среды [Электронный ресурс] : Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
5. Мударисов, Р. А. Методические подходы к оценке воздействия различных видов хозяйственной деятельности на водные объекты / Р. А. Мударисов, Н. М. Мингазова // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2011. – № 1(15). – С. 65-71. – EDN NWDGBT.
6. Демкина, А. Р. Матричный метод интегральной оценки воздействия на окружающую среду Ковыктинского газоконденсатного месторождения / А. Р. Демкина, О. В. Шулепова // АПК: инновационные технологии. – 2024. – № 2(65). – С. 52-62. – DOI 10.35524/2687-0436_2024_02_52. – EDN GLFWUS.
7. Оценка воздействия подготовленных дренажных и сбросных вод на окружающую среду матричным методом / Д. Г. Васильев, В. Ц. Челахов, Ю. Е. Домашенко, С. М. Васильев // Экология и водное хозяйство. – 2020. – № 2(5). – С. 1-12. – DOI 10.31774/2658-7890-2020-2-1-12. – EDN DEWCVY.
8. Пластинин А.Е. Оценка риска возникновения разливов нефти на внутренних водных путях // Наука и техника транспорта. 2015. № 1. С. 39-44.
9. Пластинин А.Е. Оценка размера вреда, причиненного почве, при разливах нефти с судов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2015. № 3 (31). С. 74-83. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-74-83.
10. Бурмистров Е.Г. Обеспечение экологической безопасности судостроительного производства. Проблемы и перспективы: монография – Н. Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2007. – 190 с.
11. Наумов, В. С. Технологические аспекты очистки внутренних водных путей от крупногабаритных отходов судоходства / В. С. Наумов, Е. Г. Бурмистров, И. Б. Кочнева // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции «Современные научные исследования: актуальные проблемы и тенденции». «Речной Форум 2019», Омск, 19–20 декабря 2019 года / Министерство транспорта Российской Федерации Федеральное агентство морского и речного транспорта, Омский институт водного транспорта - филиал ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта». – Омск: Омский институт водного транспорта (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Сибирский государственный университет водного транспорта", 2019. – С. 165-169. – EDN CKQLOU.
12. Студнев, С. В. Обоснование выбора технологии разделки судов на лом с учетом экономических критериев и существующих экологических ограничений [Текст] / С. В. Студнев, Е. Г. Бурмистров, Т. А. Михеева // Вестник / ВГАВТ. - Н.Новгород, 2015. - Вып. 44. - С. 192-199.
13. Наумов, В. С. Анализ экологических аспектов жизненного цикла судна / В. С. Наумов, И.Б. Кочнева // Речной транспорт (XXI век). – 2023. – № 2(106). – С. 48-50.
14. Кочнев, Ю. А., Кочнева, И. Б., & Зяблов, О. К. (2024). Разработка математической модели и алгоритма определения последовательности дефектации корпуса судна. Научные проблемы водного транспорта, (78), 66-75. https://doi.org/10.37890/jwt.vi78.455
15. Семенов, А. А., & Федорова, Л. К. (2018). Методика расчета концентраций тяжелых металлов в водной толще при взмучивании донных отложений. Экология и промышленность России, (6), 48-53.
16. Петров, А. В., & Козлова, С. И. (2021). Оценка рисков загрязнения водных объектов при проведении судоподъемных операций. Экология промышленного производства, (4), 56-63.
17. Колесников, А. С., Белова, Л. П., & Ветров, С. И. (2022). Исследование слуховой чувствительности и поведенческих реакций рыб при антропогенном воздействии. Вопросы ихтиологии, 62(4), 456-468.
18. Методика расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сварочных работах (по удельным показателям). — М.: НИИ Атмосфера, 2015. — 67 с.
19. Mukherjee, S., Siddiqi, H., Maiti, P., Parmar, P., & Meikap, B.C. (2024). A comprehensive analysis of removal of hazardous dust particulates from chemical and process industries off gases by advanced wet scrubbing techniques – A review. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 105406. DOI: 10.1016/j.jlp.2024.105406
20. Федеральный классификационный каталог отходов (утв. Приказом Росприроднадзора от 22.05.2017 № 242).
21. Alozie, N.S., & Ganippa, L.C. (2019). Diesel Exhaust Emissions and Mitigations. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.85248.

References

1. Natsional'nyy proekt «Ekologicheskoe blagopoluchie» [Ecological well-being]. URL: http://government.ru/rugovclassifier/919/about/ (data obrashcheniya 05.05.2026).
2. Pasport federal'nogo proekta «General'naya uborka» [General cleaning]. URL: file:///C:/Users/%D0%98/Downloads/177861.pdf (data obrashcheniya 05.05.2026).
3. Pasport federal'nogo proekta «Ozdorovlenie Volgi» [Improving the Volga River]. URL: https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/1e2/FP_Ozdorovlenie_Volgi_20.12.2018.pdf (data obrashcheniya 05.05.2026).
4. Ob ohrane okruzhajushhej sredy [About environmental protection] [Jelektronnyj resurs] : Federal'nyj zakon ot 10.01.2002 N 7-FZ. Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Konsul'tantPljus».
5. Mudarisov, R. A. Metodicheskie podhody k ocenke vozdejstvija razlichnyh vidov hozjajstvennoj dejatel'nosti na vodnye ob#ekty [Methodological approaches to assessing the impact of various economic activities on water bodies] / R. A. Mudarisov, N. M. Mingazova // Izvestija Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. – 2011. – № 1(15). – S. 65-71. – EDN NWDGBT.
6. Demkina, A. R. Matrichnyj metod integral'noj ocenki vozdejstvija na okruzhajushhuju sredu Kovyktinskogo gazokondensatnogo mestorozhdenija [Matrix method of integral assessment of the environmental impact of the Kovykta gas condensate field] / A. R. Demkina, O. V. Shulepova // APK: innovacionnye tehnologii. – 2024. – № 2(65). – S. 52-62. – DOI 10.35524/2687-0436_2024_02_52. – EDN GLFWUS.
7. Ocenka vozdejstvija podgotovlennyh drenazhnyh i sbrosnyh vod na okruzhajushhuju sredu matrichnym metodom [Assessment of the environmental impact of prepared drainage and discharge waters using the matrix method] / D. G. Vasil'ev, V. C. Chelahov, Ju. E. Domashenko, S. M. Vasil'ev // Jekologija i vodnoe hozjajstvo. – 2020. – № 2(5). – S. 1-12. – DOI 10.31774/2658-7890-2020-2-1-12. – EDN DEWCVY.
8. Plastinin A.E. Ocenka riska vozniknovenija razlivov nefti na vnutrennih vodnyh putjah [Assessment of the risk of oil spills on inland waterways] // Nauka i tehnika transporta. 2015. № 1. S. 39-44.
9. Plastinin A.E. Ocenka razmera vreda, prichinennogo pochve, pri razlivah nefti s sudov [Assessment of the damage caused to the soil by oil spills from ships] // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2015. № 3 (31). S. 74-83. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-74-83.
10. Burmistrov E.G. Obespechenie jekologicheskoj bezopasnosti sudostroitel'nogo proizvodstva. Problemy i perspektivy: monografija [Ensuring environmental safety in shipbuilding. Problems and prospects] – N. Novgorod: Izd-vo FGOU VPO VGAVT, 2007. – 190 s.
11. Naumov, V. S. Tehnologicheskie aspekty ochistki vnutrennih vodnyh putej ot krupnogabaritnyh othodov sudohodstva [Technological aspects of cleaning inland waterways from large-sized shipping waste] / V. S. Naumov, E. G. Burmistrov, I. B. Kochneva // Sbornik trudov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Sovremennye nauchnye issledovanija: aktual'nye problemy i tendencii». «Rechnoj Forum 2019», Omsk, 19–20 dekabrja 2019 goda / Ministerstvo transporta Rossijskoj Federacii Federal'noe agentstvo morskogo i rechnogo transporta, Omskij institut vodnogo transporta - filial FGBOU VO «Sibirskij gosudarstvennyj universitet vodnogo transporta». – Omsk: Omskij institut vodnogo transporta (filial) federal'nogo gosudarstvennogo bjudzhetnogo obrazovatel'nogo uchrezhdenija vysshego obrazovanija "Sibirskij gosudarstvennyj universitet vodnogo transporta", 2019. – S. 165-169. – EDN CKQLOU.
12. Studnev, S. V. Obosnovanie vybora tehnologii razdelki sudov na lom s uchetom jekonomicheskih kriteriev i sushhestvujushhih jekologicheskih ogranichenij [Justification of the choice of ship breaking technology based on economic criteria and existing environmental restrictions] [Tekst] / S. V. Studnev, E. G. Burmistrov, T. A. Miheeva // Vestnik / VGAVT. - N.Novgorod, 2015. - Vyp. 44. - S. 192-199.
13. Naumov, V. S. Analiz jekologicheskih aspektov zhiznennogo cikla sudna [Analysis of environmental aspects of the ship's life cycle] / V. S. Naumov, I.B. Kochneva // Rechnoj transport (XXI vek). – 2023. – № 2(106). – S. 48-50.
14. Kochnev, Yu. A., Kochneva, I. B., & Zyablov, O. K. (2024). Razrabotka matematicheskoj modeli i algoritma opredeleniya posledovatel`nosti defektacii korpusa sudna [Development of a mathematical model and algorithm for determining the consequences of hull defects]. Nauchny`e problemy` vodnogo transporta, (78), 66-75. https://doi.org/10.37890/jwt.vi78.455
15. Semenov, A. A., & Fedorova, L. K. (2018). Metodika rascheta koncentracij tjazhelyh metallov v vodnoj tolshhe pri vzmuchivanii donnyh otlozhenij [Methodology for calculating heavy metal concentrations in the water column during sedimentation]. Jekologija i promyshlennost' Rossii, (6), 48-53.
16. Petrov, A. V., & Kozlova, S. I. (2021). Ocenka riskov zagrjaznenija vodnyh ob#ektov pri provedenii sudopod#emnyh operacij [Assessment of the risks of water pollution during ship-lifting operations]. Jekologija promyshlennogo proizvodstva, (4), 56-63.
17. Kolesnikov, A. S., Belova, L. P., & Vetrov, S. I. (2022). Issledovanie sluhovoj chuvstvitel'nosti i povedencheskih reakcij ryb pri antropogennom vozdejstvii [Study of auditory sensitivity and behavioral responses of fish under anthropogenic influence]. Voprosy ihtiologii, 62(4), 456-468.
18. Metodika rascheta vybrosov zagrjaznjajushhih veshhestv v atmosferu pri svarochnyh rabotah (po udel'nym pokazateljam) [Methodology for calculating emissions of pollutants into the atmosphere during welding operations (based on specific indicators)]. — M.: NII Atmosfera, 2015. — 67 s.
19. Mukherjee, S., Siddiqi, H., Maiti, P., Parmar, P., & Meikap, B.C. (2024). A comprehensive analysis of removal of hazardous dust particulates from chemical and process industries off gases by advanced wet scrubbing techniques – A review. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 105406. DOI: 10.1016/j.jlp.2024.105406
20. Federal'nyj klassifikacionnyj katalog othodov [Federal Waste Classification Catalog] (utv. Prikazom Rosprirodnadzora ot 22.05.2017 № 242).

21. Alozie, N.S., & Ganippa, L.C. (2019). Diesel Exhaust Emissions and Mitigations. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.85248.

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

Наумов Виктор Степанович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: nauvs@mail.ru

Victor S. Naumov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of the Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, Nesterova, 5, Nizhny Novgorod, 603951, Russian Federation, e-mail: nauvs@mail.ru

Кочнева Ирина Борисовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: iringre@mail.ru

Irina B. Kochneva, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of the Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, Nesterova, 5, Nizhny Novgorod, 603951, Russian Federation, e-mail: iringre@mail.ru

Кочнев Юрий Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры проектирования и технологии постройки судов Волжского государственного университета водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: tmnnkoch@mail.ru

Yury A. Kochnev, Dr. Sci. (Eng), Professor of the Chair of Design and Technology of Ship Construction, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova street, 5, e-mail: tmnnkoch@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.06.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.06.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 23.06.2026.

Научная статья
УДК 621.7.024
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.036

Результаты опытных работ по применению перспективного способа промывки судовых гидравлических систем с использованием пульсирующего двухфазного потока

Лебедева Е.Г.[1] eg.lebedeva@narfu.ru, **Сомпольцева А.А.**[1] a.sompoltseva@narfu.ru**.**
[1]Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Аннотация. В статье рассматриваются результаты опытных работ, посвященных интенсификации процесса промывки судовых гидравлических систем с использованием двухфазного пульсирующего потока «вода-воздух». Актуальность данной темы обусловлена необходимостью сокращения длительности и повышения качества промывки протяженных, разветвленных трубопроводов больших диаметров, что является важным для современного судостроения и судоремонта. В исследовании представлены данные экспериментальных работ, выполненных в условиях строящегося объекта морской техники, с использованием современного промывочного стенда Q400 и устройства барботирования промывочной воды. Общая протяженность промываемой системы составила 250 метров при условном диаметре 125 мм, что соответствует стандартам судостроительных предприятий. В ходе экспериментов было установлено, что применение двухфазного потока позволяет ускорить вымывание загрязнений в 12,7 раза по времени по сравнению с традиционной однофазной промывкой, что открывает новые перспективы для повышения эффективности и качества обслуживания гидравлических систем на судах.
Ключевые слова: Промывка судовых систем, устройство смешения и пульсации двухфазного потока, барботирование промывочной воды, результаты опытных работ по промывке.
Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 25-29-20053.
Для цитирования: Лебедева Е.Г., Сомпольцева А.А. Результаты опытных работ по применению перспективного способа промывки судовых гидравлических систем с использованием пульсирующего двухфазного потока. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 105—112. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.036

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.036

Results of experimental work on the application of a promising method for flushing ship hydraulic systems using a pulsating two-phase flow

Elena G. Lebedeva[1] eg.lebedeva@narfu.ru, **Anna A. Sompoltseva**[1] a.sompoltseva@narfu.ru.
[1]Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

Abstract. The article discusses the results of experimental work devoted to the intensification of the process of flushing marine hydraulic systems using a two-phase pulsating flow "water-air". The relevance of this topic is due to the need to reduce the duration and improve the quality of flushing of long, branched pipelines of large diameters, which is important for modern shipbuilding and ship repair. The study presents data from experimental work performed in the conditions of a marine engineering facility under construction, using a modern Q400 flushing stand and a bubbling device for flushing water. The total length of the flushed system was 250 meters with a nominal diameter of 125 mm, which corresponds to the standards of shipbuilding enterprises. During the experiments, it was found that the use of a two-phase flow makes it possible to accelerate the leaching of pollutants by 12.7 times in time compared with traditional single-phase flushing, which opens up new prospects for improving the efficiency and quality of maintenance of hydraulic systems on ships.
Keywords: Flushing of ship systems, device for mixing and pulsating a two-phase flow, bubbling of flushing water, and results of experimental flushing operations.
Financing: The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation as part of the scientific project № 25-29-20053.
For citation: Elena G. Lebedeva, Anna A. Sompoltseva. Results of experimental work on the application of a promising method for flushing ship hydraulic systems using a pulsating two-phase flow. Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 105—112. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.036

Введение

Обеспечение чистоты внутренних полостей судовых гидравлических систем является критически важной задачей на этапе послемонтажных работ. Наличие технологических загрязнений – окалины, сварочного грата, металлической пыли – приводит к ускоренному износу прецизионных пар, засорению дросселирующих элементов и, в конечном счете, к отказам гидрооборудования [1, 2]. Для ответственных систем судовых энергетических установок, относящихся к I группе очистки, требования к чистоте регламентируются ГОСТ

© Лебедева Е.Г., Сомпольцева А.А. 2026

17216-2001, а трудоемкость промывки может достигать 15-25%, в некоторых случаях до 40% от общей трудоемкости монтажных работ [3].

Традиционная гидродинамическая промывка однофазным потоком воды со скоростью 3-4 м/с, реализуемая штатными насосами или промывочными стендами, обеспечивает удовлетворительное удаление крупных частиц (50-100 мкм), однако вымывание мелких фракций (5-10 мкм) происходит крайне медленно и неэффективно [4]. Это связано с наличием вязкого пристеночного подслоя, в котором частицы удерживаются силами адгезии на стенке трубы и не вовлекаются в турбулентное ядро потока из-за недостаточной пульсации скоростей [5]. Поэтому, для ускорения процесса промывки судовых систем применяются методы интенсификации различного направления.

Существующие методы интенсификации промывки можно разделить на пассивные (выбор оптимальных схем подключения, увеличение производительности насосов) и активные, требующие применения специальных устройств [6]. К активным методам относятся вибрационное воздействие, ультразвуковая очистка, пульсация потока, изменение направления движения среды, кавитационная обработка и барботирование (аэрирование) промывочной жидкости [7].

Анализ применимости различных методов обеспечения промышленной чистоты изделий в судостроении показывает, что некоторые технологии, такие как ультразвуковая очистка, зарекомендовавшие себя, как эффективные в авиационной и приборостроительной отраслях [8], имеют свои ограничения при работе с собранными, протяженными и разветвленными системами, где диаметр трубопроводов превышает 50 мм. Это связано с затуханием колебаний и риском разрушения сварных соединений [1]. Кантование применимо лишь для отдельных узлов на предмонтажном этапе. Изменение направления потока технологически сложно реализовать на смонтированных и протяженных системах.

В этой связи особый интерес представляет метод двухфазной промывки, заключающийся в подаче сжатого воздуха (или иного газа) в поток промывочной жидкости [9]. Образующаяся газожидкостная смесь обладает рядом преимуществ: повышенная турбулизация потока, разрушение пристеночного подслоя за счет пульсаций газовых пузырьков, флотационный эффект, способствующий выносу частиц [10]. Однако до недавнего времени данный метод считался труднореализуемым в протяженных трубопроводах из-за опасности расслоения потока и образования воздушных пробок [11].

Основная часть

1. Постановка задачи опытных работ

Целью настоящей работы являлась экспериментальная проверка применимости двухфазного пульсирующего потока для промывки реальной судовой системы в условиях строящегося заказа и определение критерия эффективности такого вида промывки по времени. Исследования проводились на объекте морской техники при участии специалистов АО «ПО «Севмаш», АО «ЦТСС» и АО «СПМБМ «Малахит».

Объектом промывки выбраны магистральные трубопроводы судовой системы. Характеристики объекта:

- общая протяженность промываемого участка – 250 м;
- максимальный внутренний диаметр трубопроводов – 125 мм;
- высотная отметка расположения системы относительно промывочного стенда – около 15 м выше горизонтальной плоскости расположения магистрали (подключение осуществлялось с технологических лесов).

Выбор объекта обусловлен его доступностью для проведения замеров и возможностью отключения штатного оборудования на период опытных работ для исключения рисков его повреждения двухфазным потоком.

В качестве промывочного средства использовался переносной стенд испытаний и промывки Q400, разработанный АО «ЦТСС». Стенд обеспечивает расход промывочной воды от 10 до 450 м³/ч, давление до 1,25 МПа и оснащен системой фильтрации с тонкостью 50-200 мкм. Схема подключения стенда и устройства барботирования представлены на рис. 1.

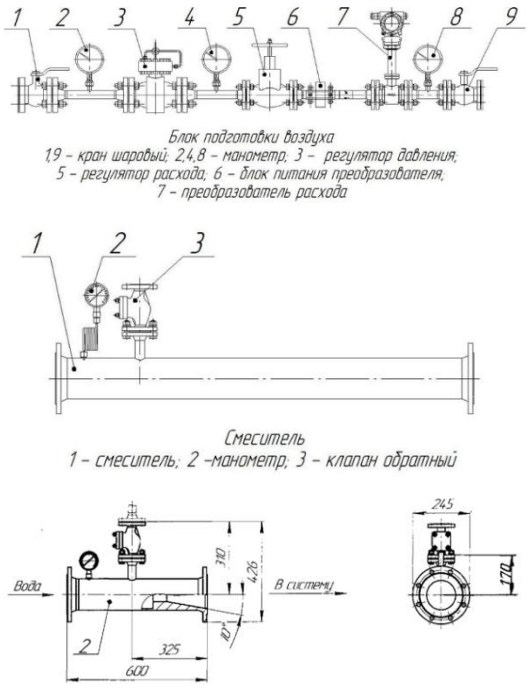


Рис. 1. Принципиальная схема подключения промывочного стенда с УБПВ и конструкция смесителя.

Для интенсификации процесса использовалось устройство барботирования промывочной воды УБПВ в составе:

- блок подготовки воздуха (обеспечивает регулировку давления и расхода сжатого воздуха от системы ВСД-45);
- смеситель (врезка в напорную магистраль DN125 для первичного смешения);

Монтаж УБПВ выполнен в соответствии с требованиями руководства по эксплуатации и исходными данными для проектирования. Подача воздуха осуществлялась от заводской магистрали

ВСД-45 через блок подготовки, расположенный на лесах Э-1 ССП.

2. Методика проведения эксперимента

Опытные работы проводились в соответствии с разработанной программой и методикой испытаний.

Промывочный стенд (рис. 2) содержит бак-накопитель с промывочной жидкостью (водой), из которого можно при необходимости осуществить слив воды и стравить воздух. Бак должен располагаться в верхних геометрических точках. В промывочном стенде используется два промывочных насоса N1 и N2. Насосы могут работать в одиночку и параллельно. Отсечение насосов осуществляется клапанами Кл10-Кл13. Расходомер Р1 используется для измерения объемного расхода промывочной воды. Манометр М1 регистрирует давление в промываемом однофазном потоке воды. Далее поток поступает к тройнику и в зависимости от решаемой задачи направляется в виде однофазного (через открытые клапаны Кл6 и Кл8, клапаны Кл5 и Кл 7 при этом закрыты) или двухфазного потока (через открытые клапаны Кл5 и Кл7, клапаны Кл6 и Кл8 при этом закрыты) к промываемой системе. Процесс подачи воздуха в смеситель производится от баллона сжатого воздуха при открытом клапане Кл9. Количество сжатого воздуха регулируется клапаном Кл9.

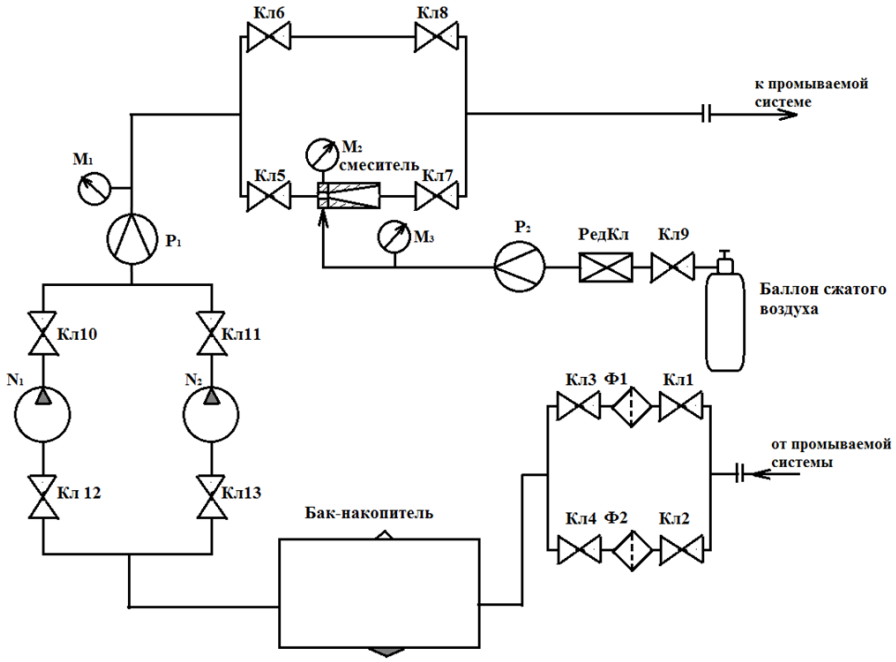


Рис. 2. Принципиальная схема промывочного стенда с использованием пульсирующего двухфазного потока

Основная задача заключалась в получении сравнительных данных по эффективности промывки при чередовании режимов:

1. Режим А (контрольный, однофазный) – промывка только водой через штатные сливные фильтры стенда (Ф2-Ф4).
2. Режим Б (исследуемый, двухфазный) – промывка с подачей воздуха через УБПВ, отбор загрязнений через параллельную группу фильтров (Ф5-Ф7).

Опытные промывки включали серию циклов продолжительностью от 20 до 90 минут в течение 4 рабочих дней с суммарной продолжительностью 18,7 часа, из которых непосредственно с подачей воздуха – 5,2 часа.

Контролировались следующие параметры:

- расход воды Q' (по штатному расходомеру стенда ДР1);
- расход воздуха Q" (по расходомеру блока подготовки УБПВ);
- давление в напорной магистрали и в смесителях (по манометрам);
- температура промывочной среды;
- масса загрязнений, задержанных бязевыми фильтроэлементами (определялась взвешиванием в лаборатории НИТИЦ после сушки).

Фильтроэлементы предварительно взвешивались, после каждого цикла извлекались, просушивались и упаковывались в индивидуальные маркированные пакеты. Микроскопический анализ загрязнений проводился с увеличением для оценки гранулометрического состава.

Итоговое объемное воздухосодержание φ рассчитывалось по формуле: $\varphi = Q''/(Q'+Q'')$, с учетом изотермического расширения воздуха при входе в систему с меньшим давлением.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

В ходе опытных работ были зафиксированы существенные различия в массе вымытых загрязнений при использовании однофазного и двухфазного потоков. Сводные данные представлены в табл. 1 и на рис. 3. Характер распределения массы вымытых загрязнений по дням промывки, представленный на рисунке 3, является характерным и для обычного типа гидродинамической промывки, что обусловлено тем, что в первые моменты промывки вымывается большая масса загрязнений.

Таблица 1.

Масса вымытых загрязнений и коэффициент ускорения за день (или за два последовательных цикла)

День/цикл промывки*	Порядковый номер цикла промывки	Однофазный поток		Двухфазный пульсирующий поток					Суммарная масса загрязнений, $M = M_{од} + M_{дв}$, мг	Коэффициент ускорения за день (или за два последовательных цикла), $k_у = M_{дв}/M_{од}$	Отношение массы вымытых загрязнений за цикл двухфазной промывки к общей массе $M_{дв}/M*100\%$
		Масса загрязнений в режиме без УБПВ $M_{од}$, мг	Расход промывочной воды, Q/, м³/час	Масса загрязнений в режиме с УБПВ $M_{дв}$, мг	Расход промывочной воды, Q/, м³/час	Расход воздуха с учетом изотермического расширения в трубопроводе, Q//, м³/час	Расход промывочной смеси $Q_{см}=Q'+Q''$, м³/час	Объемное воздухосодержание, $\varphi=Q''/(Q'+Q'')$			
0/ -	-	не известно	-	не известно	-	-	-	-		-	
1/ 1*-2	1-2	310	62	7500	40	12,71	52,71	0,24	7810	24,2	96
1,5/ 3*-4	3-4	480	62	20360	40	15,10	55,10	0,27	20840	42,4	98
2/ 1*-2-3*-4-5*	5-6-7-8-9	640	64	5970	36	19,04	55,04	0,34	6610	9,3	90
3/ 1*-2-3*-4	10-11-12-13	610	85	1780	53	26,49	79,49	0,34	2390	2,9	74
4/ 1*-2-3*-4	14-15-16-17	900	146,5	1720	104,5	23,91	128,41	0,19	2620	1,9	66
Итого		2940		37330					40270		93

*- нечетный цикл промывки соответствует промывке без применения устройства барботажа, - четный цикл промывки соответствует промывке с применением устройства барботажа

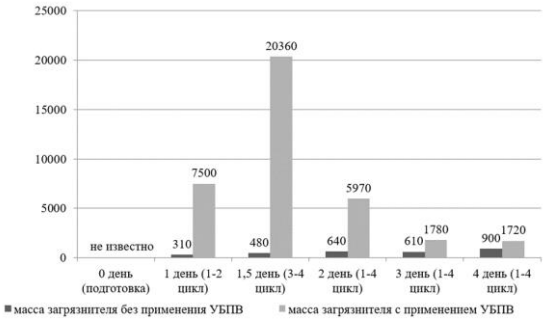


Рис. 3. Гистограмма распределения массы вымытых загрязнений по дням промывки

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Максимальная эффективность на начальном этапе. В первый и второй день промывки, когда система содержала наибольшее количество рыхлых технологических загрязнений (окалина, сварочный грат, пыль), коэффициент ускорения достиг значения 24,2 – 42,4. Это свидетельствует о высокой интенсивности отрыва и выноса частиц при первом контакте двухфазного потока с загрязненными стенками.
2. Закономерное снижение коэффициента ускорения. По мере очистки системы (3-4 дни) эффективность двухфазной промывки снижалась до 1,9, что объясняется уменьшением количества доступных для удаления загрязнений. Тем не менее, даже на завершающей стадии двухфазный поток вымывал почти в 2 раза больше частиц, чем однофазный при равных временных затратах.
3. Интенсивное вымывание крупных частиц. Визуальный осмотр и микрофотографии фильтроэлементов (рис. 3) показали, что в режимах с УБПВ на фильтрах присутствуют более крупные механические примеси (металлическая стружка, частицы абразива), которые практически отсутствуют при установившихся режимах промывки без барботажа.
4. Влияние расходных параметров. Оптимальные результаты по выносу загрязнений зафиксированы при расходе воды 40-60 м³/ч и расходе воздуха 12-19 м³/ч, что соответствует объемному воздухосодержанию φ = 0,24-0,27. При данных значениях не наблюдались негативные сопутствующие явления в виде шума и вибрации.



Рис. 4. Микросъемка загрязнений на фильтрах (слева – однофазный режим, справа – двухфазный), фотографии выполнены НИТИЦ АО «ПО «Севмаш».

Суммарная масса загрязнений, вынесенных за 4 дня двухфазной промывки, составила 37 330 мг против 2 940 мг при однофазной. Таким образом, 93% всех удаленных загрязнений вымыто именно при подаче воздуха в поток.

Средняя скорость вымывания (интенсивность) составила:

- для однофазного потока – 315 мг/час;
- для двухфазного потока – 4001 мг/час.

Эффективность вымываемости частиц загрязнений по времени (отношение скоростей вымывания) составляет 4001/315 = 12,7. Это означает, что применение двухфазной промывки позволяет сократить время достижения требуемой чистоты более чем в 12 раз.

Теоретический анализ проведенных опытных работ по промывке судовых магистральных трубопроводов, проведенный при помощи МГК (метода главных компонентов) [12] показал, что основной вклад в эффективность процесса вымываемости частиц загрязнений при обоих способах промывки оказывает фактор времени, определенный для всех 17 циклов промывки, рис. 5. Очевидно, что интенсивность вымывания частиц загрязнений зависит от сроков проведения промывочных работ. Причем, количество частиц, вымытых за весь период промывки больше при проведении промывки с использованием двухфазного потока (метода барботирования).

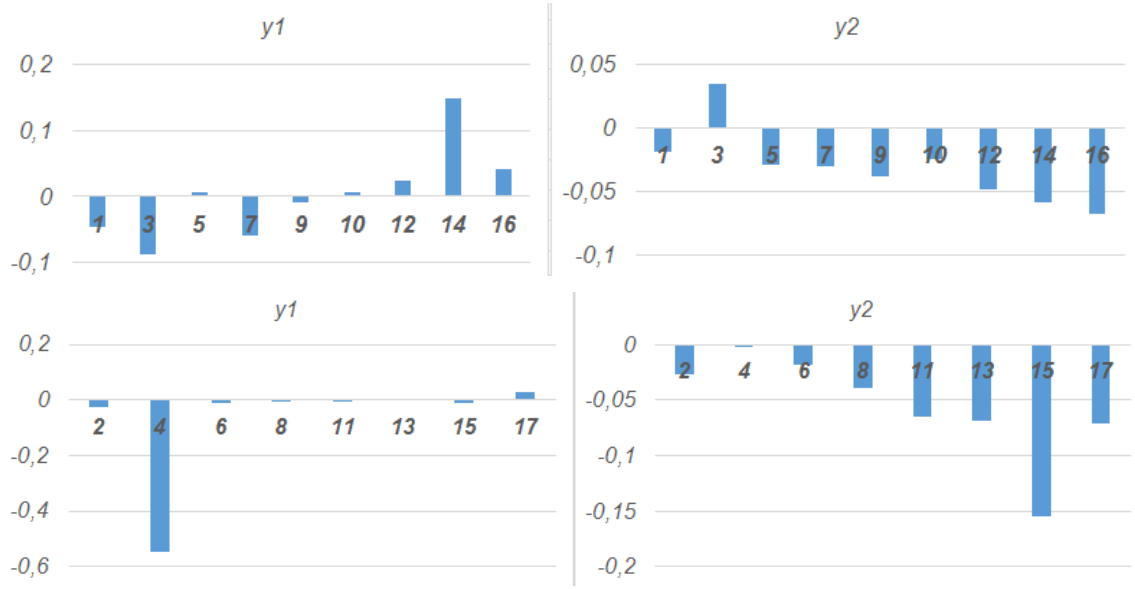


Рис. 5. Потенциалы параметра гидроочистки магистрального трубопровода во времени
y1 - доля вымытых частиц загрязнений по циклам промывки, приходящихся за счет использования однофазного потока (без применения барботажа, номера циклов 1-3-5-7-9-10-12-14-16))
y2 - доля вымытых частиц загрязнений по циклам промывки, приходящихся за счет использования двухфазного потока (с применением барботажа, номера циклов 2-4-6-8-11-13-15-17)

Анализ, проведенный с помощью метода главных компонентов, показал, что кроме временного фактора на процесс промывки наибольшее значение оказывают факторы, задающие режимы промывки и промывочной среды, а именно (табл.1):

1) расход промывочной воды, $Q^{/}$ ($м^3$/час) при обоих способах промывки;

2) расход воздуха с учетом изотермического расширения в трубопроводе, $Q^{//}$, $м^3$/час (при двухфазном способе);

3) время подачи воздуха (не приведено в данной статье);

4) давление промывочной воды (не приведено в в данной статье).

Например, выявленные всплески по массе загрязнений, отмеченные в конце промывочных работ (4 день) в период использования однофазного потока без барботирования промывочного потока связан с увеличением пульсаций потока при увеличении расхода промывочной среды и отрывом частиц загрязнений в период предыдущего применения двухфазного потока в качестве промывочного (рис. 6).

Результаты выполненных циклов гидропромывки трубопроводов на строящемся заказе с учётом влияющих связей, распределенных по циклам с нумерацией от 1 до 17 (рис. 6) показал, что на интенсивность промывочных работ оказывает влияние различные факторы. Причем, основной вклад осуществляет временной фактор. После характерного всплеска количества вымытых частиц в первые часы промывки, потенциал времени, влияющий на результаты промывки, полностью не исчерпывается. Промывка системы с помощью двухфазной среды продолжает оказывать положительное влияние на дальнейшее вымывание, в то время как вымывание с помощью однофазного потока практически прекращается.

Таким образом, использование барботирования промывочной среды (номера циклов 2-4-6-8-11-13-15-17) усиливает вымывание частиц загрязнений в период применения однофазного потока (номера циклов 1-3-5-7-9-10-12-14-16).

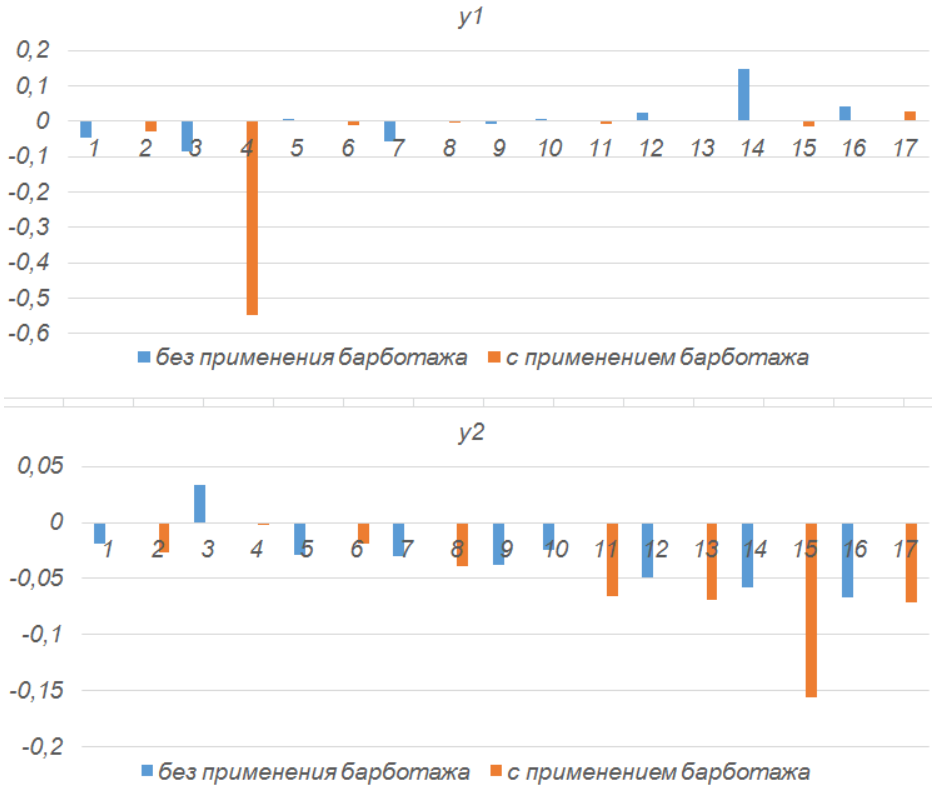


Рис. 6. Результаты выполненных циклов гидропромывки трубопроводов на строящемся заказе с учётом влияющих связей.
y1 - доля вымытых частиц загрязнений по циклам промывки, приходящихся за счет использования однофазного потока (без применения барботажа)
y2 - доля вымытых частиц загрязнений по циклам промывки, приходящихся за счет использования двухфазного потока (с применением барботажа)

4. Анализ негативных явлений и ограничений

В ходе опытных работ выявлен ряд особенностей, требующих учета при внедрении технологии:

1. Рост уровня воды в расходном баке. При подаче воздуха наблюдалось повышение уровня воды в баке стенда за счет увеличения объема смеси в первый момент подачи воздуха в промываемую систему. Для исключения переливов потребовалось дренирование части воды и более осторожная подача воздуха в систему в первые моменты в дальнейшем. Это явление необходимо учитывать при проектировании сливных магистралей и систем деаэрации.
2. Риск завоздушивания удаленных участков. При подключении перемычек, расположенных значительно выше уровня магистральных трубопроводов, возможно образование устойчивых воздушных пробок. Для их устранения требуется предусматривать устройства стравливания воздуха в верхних точках системы.
3. Повышенные требования к креплению трубопроводов. Двухфазный поток создает дополнительные вибрационные нагрузки, особенно на участках с гибкими вставками. На период промывки рекомендуется предусматривать технологическое раскрепление трубопроводов.
4. Ограничение применения на разветвленных системах. Промывку с барботажем нецелесообразно использовать на сильно разветвленных системах с множеством параллельных ветвей малого диаметра (менее DN50) из-за высокой вероятности неравномерного распределения воздуха и образования застойных зон.

Выводы

Результаты проведенных опытных работ подтверждают высокую эффективность двухфазного пульсирующего потока как метода интенсификации промывки судовых гидравлических систем. Основные итоги:

1. Подтверждена работоспособность устройства барботирования промывочной воды (УБПВ) в реальных производственных условиях на строящемся объекте морской техники.
2. Экспериментально установлено, что применение двухфазного потока обеспечивает ускорение вымывания технологических загрязнений в 12,7 раза по сравнению с традиционной однофазной промывкой. При этом 93% общей массы удаленных загрязнений вымыто именно в режиме с подачей воздуха.
3. Коэффициент ускорения выведения примесей достигает 24-42 на начальных этапах промывки при максимальном исходном загрязнении и

закономерно снижается до 1,9-2,9 по мере очистки системы до требуемых параметров чистоты.

4. Проведенный анализ опытных данных с помощью МГК позволил оценить взаимно влияющие факторы, выявленные в процессе промывки и установить определяющие параметры, такие как расход и давление промывочной среды, расход воздуха, время подачи воздуха, сроки промывочных работ и т.д.
5. Выявлены оптимальные режимные параметры: объемное воздухосодержание φ = 0,24-0,27, расход воды 40-105 м³/ч, расход воздуха 12-25 м³/ч. При этих параметрах обеспечиваются хорошие условия вымываемости частиц загрязнений, устойчивые условия работы насоса на промываемую систему, отсутствовали негативные явления, такие как шум и вибрация труб, что говорит о стабильности процесса.
6. Определены конструктивные и технологические ограничения метода, включая необходимость усиленного крепления трубопроводов, контроля уровня в расходном баке и устройств для стравливания воздуха в верхних точках.

Полученные результаты позволяют рекомендовать двухфазную пульсирующую промывку для широкого внедрения на этапе очистки магистральных трубопроводов общесудовых систем, что даст значительный экономический эффект за счет сокращения сроков постройки судов.

Литература

1. Соловьев Б.С., Константинов Е.А. Предпусковые очистки и промывки оборудования ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
2. Соловьев Б.В. Очистка судовых систем от технологических загрязнений. – Л.: Судостроение, 1977. – 75 с.
3. ГОСТ 17216-2001. Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей. – М.: Стандартинформ, 2001.
4. Тимиркеев Р.К., Сапожников В.М. Промышленная чистота и тонкая фильтрация рабочих жидкостей летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1986. – 152 с.
5. Лебедева Е.Г. Ершова И.В., Влияние величины пульсации скорости в промывочном потоке на эффективность промывки. Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 1-1 (67). С. 70-74.
6. Белянин П.Н., Данилов В.М. Промышленная чистота машин. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
7. Санчугов В.И., Абрамов А.А., Иванов Ю.И., Мещеряков С.С. Гидродинамическая очистка внутренней поверхности трубопроводов систем гидравлики // Технология судостроения и машиностроения. – 1992. – №5. – С. 23-25.
8. Сапожников В.М. Монтаж и испытание гидравлических систем летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1979. – 256 с.
9. Канаев Д.Н., Лямин П.Л., Лебедева Е.Г., Александров Н.И., Новые средства технологического оснащения для промывки судовых водяных систем и оборудования. Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 2-1 (21). С. 93-95.
10. Лебедева Е.Г. Интенсификация технологии промывки судовых систем пульсирующим двухфазным потоком: дис. ... канд. техн. наук. – СПб.: СПГУВК, 2012. – 162 с.
11. Гавриленко С.И., Дубровин В.В., Грибков В.Н., Павловский Ю.И. Использование газожидкостных потоков для очистки судовых трубопроводов // Технология судостроения и машиностроения. – 1995. – №10. – С. 23-25.
12. Герман, Г. В. Методы оценки производственно-технологических работ в судостроении / Г. В. Герман, Н. В. Никитин // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 4-2(54). – С. 135-139. – DOI 10.37220/MIT.2021.54.4.079. – EDN APKBSV.

References

1. Soloviev B.S., Konstantinov E.A. Pre-start cleaning and flushing of nuclear power plant equipment. – M.: Energoatomizdat, 1984. – 160 p.
2. Soloviev B.V. Cleaning ship systems from technological contaminants. – L.: Sudostroenie, 1977. – 75 p.
3. GOST 17216-2001. Industrial cleanliness. Liquid purity classes. – Moscow: Standartinform, 2001.
4. Timirkeev R.K., Sapozhnikov V.M. Industrial purity and fine filtration of working fluids of aircraft. – M.: Mashinostroenie, 1986. – 152 p.
5. Lebedeva E.G. Ershova I.V., Influence of the velocity pulsation in the washing flow on washing efficiency. Marine Intelligent Technologies. 2025. No. 1-1 (67). P. 70-74.
6. Belyanin P.N., Danilov V.M. Industrial cleanliness of machines. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 224 p.
7. Sanchugov V.I., Abramov A.A., Ivanov Yu.I., Meshcheryakov S.S. Hydrodynamic cleaning of the internal surface of hydraulic system pipelines // Technology of shipbuilding and mechanical engineering. - 1992. - No. 5. - P. 23-25.
8. 8. Sapozhnikov V.M. Installation and testing of hydraulic systems of aircraft. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 256 p.9. Gal'perin N.I. Osnovnye processy i apparaty himicheskoj tekhnologii. M., Himiya, 1981, 812 s.
9. Kanaev D.N., Lyamin P.L., Lebedeva E.G., Aleksandrov N.I., New means of technological equipment for flushing ship's water systems and equipment. International Research Journal. 2014. No. 2-1 (21). P. 93-95.
10. Lebedeva E.G. Intensification of technology for flushing ship systems with a pulsating two-phase flow: dis. ... Cand. of Technical Sciences. - St. Petersburg: SPbGUVK, 2012. - 162 p.
11. Gavrilenko S.I., Dubrovin V.V., Gribkov V.N., Pavlovsky Yu.I. Use of gas-liquid flows for cleaning ship pipelines // Technology of shipbuilding and mechanical engineering. - 1995. - No. 10. - P. 23-25.
12. German, G. V. Methods of Estimating Production and Technological Work in Shipbuilding / G. V. German, N. V. Nikitin // Marine Intellectual Technologies. – 2021. – No. 4-2(54). – Pp. 135-139. – DOI 10.37220/MIT.2021.54.4.079. – EDN APKBSV.

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

Компольцева Анна Александровна, старший преподаватель кафедры кораблестроения, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 163002, Российская Федерация, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17, e-mail: a.sompoltseva@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

Anna A. Sompoltseva, Senior teacher 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: a.sompoltseva@narfu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 29.05.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.07.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 29.07.2026.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Научная статья
УДК 621.436:629.5
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.037

Повышение достоверности оценки текущего технического состояния судовых дизельных двигателей с учётом разноточности параметров диагностических каналов

Афанасьев М.П.[1] mikhailafanasev@yandex.ru, **Афанасьева О.В.**[2] afanaseva_ov@pers.spmi.ru**,**
Хатрусов А.С.[2] me@hatrusov.ru
[1]Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
[2]Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

Аннотация. В статье рассматривается задача повышения достоверности диагностирования судовых дизельных двигателей при наличии двух измерительных каналов, характеризующихся различной точностью и наличием корреляционной связи погрешностей, обусловленной общими источниками помех и режимными факторами. Целью работы является разработка и верификация подхода к объединению разноточных диагностических каналов, учитывающего корреляцию их ошибок и позволяющего определять граничные условия, при которых добавление дополнительного канала улучшает, не изменяет или ухудшает качество эксплуатационного решения, оцениваемое через вероятности ложной тревоги, пропуска дефекта и интегральный риск. Установлено, что объединение на уровне измерений обладает высокой устойчивостью: оптимальный вес автоматически ограничивает вклад второго канала при неблагоприятном сочетании параметров, не допуская существенного ухудшения качества диагностирования. Для объединения на уровне решений выявлены области параметров, в которых добавление менее точного и коррелированного канала приводит к росту вероятности пропуска дефекта и увеличению интегрального риска. Предложен критерий применимости пороговых схем в виде граничной зависимости допустимого коэффициента корреляции от относительной точности второго канала. Полученные результаты предоставляют формализованные границы целесообразности использования дополнительных диагностических каналов в условиях ограниченной доступности датчиков и наличия общих источников помех.

Ключевые слова: судовой дизельный двигатель; предиктивное обслуживание; обслуживание по техническому состоянию; объединение измерений; объединение решений; корреляция ошибок; разноточность каналов; ложная тревога; пропуск отклонения; карта применимости
Для цитирования: Афанасьев М.П., Афанасьева О.В., Хатрусов А.С. Повышение достоверности оценки текущего технического состояния судовых дизельных двигателей с учётом разноточности параметров диагностических каналов, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 113—123. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.037

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.037

Improving the Reliability of Assessing the Current Technical Condition of Marine Diesel Engines Considering Unequal Accuracy of Diagnostic Channels

Mikhail P. Afanasyev[1] mikhailafanasev@yandex.ru**, Olga V. Afanaseva**[2] afanaseva_ov@pers.spmi.ru**,**
Aleksandr S. Khatrusov[2] me@hatrusov.ru
[1]Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation
[2]Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. This paper addresses the problem of improving diagnostic reliability for marine diesel engines when two measurement channels are available. These channels are characterized by different accuracy levels and exhibit correlated errors due to common noise sources and operational factors. The aim of this study is to develop and verify an approach for fusing diagnostic channels of unequal accuracy that accounts for error correlation. The approach enables the determination of boundary conditions under which adding a secondary channel improves, does not change, or degrades the quality of operational decisions. Decision quality is assessed through false alarm probability, defect omission probability, and integral risk. It is established that measurement-level fusion exhibits high robustness: under unfavorable parameter combinations, the optimal weight automatically limits the contribution of the second channel, preventing significant degradation of diagnostic performance. For decision-level fusion, parameter regions are identified where adding a less accurate, correlated channel increases both defect omission probability and integral risk. An applicability criterion for threshold-based fusion schemes is proposed, expressed as a boundary dependence of the permissible correlation coefficient on the relative accuracy of the second channel. The obtained results provide

© Афанасьев М.П., Афанасьева О.В., Хатрусов А.С. 2026

formalized boundaries for the feasibility of using additional diagnostic channels under conditions of limited sensor availability and common noise sources.
Keywords: marine diesel engine; predictive maintenance; condition-based maintenance; measurement fusion; decision fusion; error correlation; unequal channel accuracy; false alarm; deviation omission; applicability map
For citation: Mikhail P. Afanasyev, Olga V. Afanaseva, Aleksandr S. Khatrusov, Improving the Reliability of Assessing the Current Technical Condition of Marine Diesel Engines Considering Unequal Accuracy of Diagnostic Channels, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 113—123. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.037

Введение

Современный этап развития мирового транспортного и технического флота специального назначения характеризуется ужесточением требований к безопасности мореплавания, экономической эффективности и экологической безопасности эксплуатации судовых энергетических установок (СЭУ) [1-3]. Бесперебойная работа главных и вспомогательных дизельных двигателей СЭУ во многом определяет надежность и живучесть судна в целом. Переход от планово-предупредительной системы ремонта СЭУ к обслуживанию по фактическому техническому состоянию является главным направлением повышения эффективности их эксплуатации [4,5]. Однако практическая реализация этого подхода упирается в проблему достоверности диагностической информации [6,7].

Сложность современных судовых дизельных двигателей (СДД) как объектов диагностирования, многообразие протекающих в них термогазодинамических, трибологических и виброакустических процессов, а также тяжелые условия эксплуатации приводят к необходимости использования множества измерительных каналов [6,8]. Традиционные методы оценки технического состояния часто основываются на анализе параметров, получаемых от отдельных датчиков или диагностических трактов, каждый из которых характеризуется собственной точностью (дисперсией ошибки). Более того, ошибки измерений различных физических величин, отражающих один и тот же скрытый процесс, как правило, коррелированы между собой [9,10]. Игнорирование данной «разноточности» и взаимной корреляции погрешностей при интеграции данных может приводить к статистической некорректности выводов, что в условиях реальной эксплуатации чревато ростом рисков двух категорий: пропуска опасного дефекта и ложной тревоги (экономически неоправданный простой судна и внеплановый ремонт) [11-13].

На сегодняшний день существует значительное количество работ, посвященных многопараметрической диагностике двигателей внутреннего сгорания. Однако вопросы создания формализованных критериев, позволяющих однозначно определить целесообразность включения того или иного дополнительного диагностического канала в контур принятия решений, особенно с учетом негативного влияния корреляции ошибок на суммарную неопределенность, остаются недостаточно проработанными. Не определена четкая граница условий, при которых увеличение информативности за счет привлечения новых данных не улучшает, а парадоксальным образом ухудшает качество эксплуатационных решений [14,15].

Настоящая работа направлена на восполнение указанного пробела. Целью исследования является разработка и верификация подхода к объединению разноточных диагностических каналов с учётом корреляции их ошибок, позволяющего определять граничные условия, при которых добавление дополнительного канала улучшает, не изменяет или ухудшает качество эксплуатационного решения, оцениваемое через показатели ложных тревог, пропусков дефектов и интегральные риски.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Разработка математической модели двух измерительных трактов, характеризующихся разноточностью (различными дисперсиями) и наличием корреляционной связи ошибок.
2. Определение и формализация эксплуатационных шкал качества диагностирования и интегрального показателя риска от принятия неверного решения.
3. Разработка методики сопоставительного анализа стратегий объединения диагностической информации: на уровне данных (до порога) и на уровне решений (после порога), при фиксированной допустимой вероятности ложной тревоги.
4. Построение карт применимости и определение граничных условий (пределов корреляции и соотношения дисперсий), в которых учет информации от второго диагностического канала является статистически и эксплуатационно оправданным.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран СДД СЭУ, для которого реализация стратегий предиктивного обслуживания и технического обслуживания по состоянию требует обеспечения устойчивости принимаемых решений в условиях реальной эксплуатации [6,16]. Особенность решаемой задачи заключается в неполной наблюдаемости внутреннего состояния СДД. Например. прямое и исчерпывающее измерение параметров процессов, происходящих в цилиндропоршневой группе, и степени текущего износа её элементов, сопряжено с техническими ограничениями, что обусловливает необходимость использования косвенных измерений, методов восстановления сигналов и расчетных показателей [17, 18].

Базовый алгоритм контроля реализуется на основе данных штатной системы мониторинга [19-21]. В целях повышения информативности диагностического обеспечения дополнительно привлекаются расчетные показатели, получаемые с использованием математических моделей и алгоритмов реконструкции (так называемые «виртуальные датчики») [16, 22]. В подобных схемах принципиальное значение приобретает учет достоверности выходных данных и связанной с ними

неопределенности, поскольку как погрешности прямых измерений, так и ошибки моделирования способны оказывать существенное влияние на финальное эксплуатационное решение.

Для формализации задачи вводится понятие скрытой (латентной) диагностической переменной X, интерпретируемой как нормированный показатель технического состояния либо нормированный остаточный параметр. Данная переменная служит основой для бинарного правила принятия решения по схеме «норма/тревога». В рамках исследования рассматриваются два канала наблюдения за состоянием: канал 1, соответствующий штатному (как правило, более точному) средству измерения, и канал 2, представляющий собой дополнительный источник информации, характеризующийся либо меньшей точностью, либо альтернативным физическим принципом формирования диагностического показателя.

Наблюдения задаются моделью:

$$Z_1 = X + \varepsilon_1, Z_2 = X + \varepsilon_2. \quad (1)$$

Разноточность и зависимость ошибок каналов задаются условиями:

$$D(\varepsilon_j) = \sigma_j^2, E[\varepsilon_j] = 0, E[\varepsilon_1\varepsilon_2] = \rho\,\sigma_1\sigma_2, \quad (2)$$

где ε_j объединяет шум датчика, погрешность модели/реконструкции и режимные возмущения; σ_1, σ_2 задают разноточность трактов, а ρ – коэффициент корреляции ошибок. При эксплуатации СДД взаимозависимость ошибок каналов является реальной, вследствие воздействия общих режимных факторов (нагрузка / обороты), вибрационных воздействий, калибровочных и синхронизационных погрешностей, а также дрейфа расчётных параметров при длительной работе. В более общей постановке многоканального объединения необходимо подчеркнуть, что согласованность и качество источников определяют достоверность результатов диагностирования. Для этого в модель вводятся корреляционно-адаптивные механизмы и учёт неопределённости.

Для построения «карт применимости» целесообразно перейти к безразмерной нормировке точности:

$$s_j = \frac{\sigma_j}{\sigma_X}, \quad (3)$$

где σ_X – масштаб изменчивости X в номинальном режиме. Такая нормировка позволяет анализировать эффект добавления тракта как функцию относительной «грубости» канала при фиксированных параметрах контроля и не привязываться к единицам измерения исходных сигналов.

Принятие решения формулируется бинарно: $\bar{A}$ – «нет тревоги», A – «тревога». Учитывая дисбаланс данных (нормальных режимов существенно больше, чем режимов с отклонениями), отклонения рассматриваются как редкие события с заданной априорной долей $\pi_{\text{откл}}$. Качество решений оценивается через вероятности ошибок:

$$\alpha = P(\text{А} \mid \text{норма}), \beta = P(\bar{\text{А}} \mid \text{отклонение}) \quad (4)$$

где α – вероятность ложной тревоги, β – вероятность пропуска отклонения. Такая параметризация соответствует логике практического применения: в морских системах контроля обуславливается необходимость снижения ложных тревог, а ценность результата определяется влиянием на принятие решений по эксплуатации и обслуживанию. Для интегрального сравнения схем используется взвешенный критерий риска:

$$J = \gamma_{\text{лт}}\,\alpha + \gamma_{\text{пр}}\,\beta, \quad (5)$$

где $\gamma_{\text{лт}}$ и $\gamma_{\text{пр}}$ – веса ложной тревоги и пропуска соответственно. Смысл такой постановки согласуется с приоритетом обслуживания по техническому состоянию, где стоимость отказа и профилактического действия различаются; в [23] затраты на отказ и профилактику вводятся явно в модели принятия решений по замене, что отражает эксплуатационную неравноценность двух типов ошибок.

В рамках настоящего исследования проводится сравнительный анализ двух принципиально различных подходов к интеграции диагностической информации, обозначаемых как объединение на уровне измерений (до порогового решения) и объединение на уровне решений (после локальных порогов).

1. Объединение на уровне измерений, что предполагает формирование непрерывного агрегированного показателя с последующим введением единого порога принятия решения о наличии неисправности. В практике морских систем контроля и диагностики находит применение концепция усреднения нормированных «оценок аномальности» сигналов нескольких каналов. Так, в работе [11] предложен непрерывный согласованный показатель, вычисляемый как среднее арифметическое по нормированным оценкам, с последующим сравнением с пороговым значением. Развивая данный подход, в настоящей работе используется весовое обобщение для двух измерительных каналов:

$$Z(w) = wZ_1 + (1-w)Z_2, w \in [0,1], \quad (6)$$

где итоговое решение о наличии тревоги принимается путем сравнения объединенного показателя $Z(w)$ с порогом τ. Альтернативным способом установления пороговых значений может служить подход, изложенный в [8], в рамках которого непрерывный показатель (характеризующий ошибку либо интенсивность отклонения) преобразуется в пороговое решение посредством алгоритмов автоматического выделения аномальных областей на основе матрицы значений. Такой подход рассматривается как один из возможных методов калибровки порога в условиях отсутствия априорно заданного устойчивого критерия.

2. Объединение на уровне решений, которое основывается на предварительном формировании каждым диагностическим каналом локального бинарного решения с последующим их объединением, используя логические правила. В работе [11] подобный подход реализован через механизм голосования: каждый канал генерирует бинарный «голос», а итоговое решение определяется правилом большинства. Для случая двух каналов задача сводится к применению предельных логических правил:

$$A_1 = I(|Z_1| \geq \tau_1), A_2 = I(|Z_2| \geq \tau_2), \quad (7)$$

$$A = A_1 \vee A_2 \text{ или } A = A_1 \wedge A_2 \quad (8)$$

где $I(.)$ – индикаторная функция, τ_1, τ_2 – локальные пороговые значения.

Количественная оценка эффекта от введения второго диагностического канала выражается через разность интегральных рисков:

$$\Delta J = J_{\text{схема}} - J_{\text{канал 1}}, \quad (9)$$

где $J_{\text{схема}}$ - значение интегрального риска J для рассматриваемой схемы принятия решения, а $J_{\text{канал 1}}$ – значение интегрального риска для эталонного решения, принимаемого исключительно по первому (наиболее точному) каналу. В отдельных практических ситуациях может применяться многоэтапная логика принятия решений, требующая одновременного выполнения условий как по согласованному непрерывному показателю, так и по результатам голосования, что, согласно [11], позволяет дополнительно уменьшить вероятность ложных тревог и повысить качество контроля.

Основной принцип предложенной методики – обеспечение корректного сравнения различных подходов к объединению диагностической информации. С этой целью пороговые значения τ (для схемы объединения до порога) и τ_1, τ_2 (для схемы объединения после порога) выбираются таким образом, чтобы гарантировать выполнение одинакового ограничения на вероятность ложной тревоги в номинальном (бездефектном) режиме функционирования: $(\alpha \leq \alpha_0)$. После фиксации пороговых уровней, удовлетворяющих данному условию, сравнительный анализ проводится по вероятности пропуска дефекта β и/или по интегральному показателю риска J. Такой подход в полной мере соответствует практике контроля морских объектов, ориентированной на минимизацию ложных тревог при сохранении достоверности результатов диагностирования, и согласуется с эксплуатационной логикой организации технического обслуживания и принятия решений.

Учет неопределенности рассматривается как обязательное условие решения задач прогнозирования и диагностики морских объектов. В исследовании [24] обоснована важность количественной оценки неопределенности для решения прогностических задач, а в работе [14] неопределенность используется в качестве меры доверия к источникам информации при их интеграции. В контексте настоящего исследования параметр корреляции ρ интерпретируется как агрегированная характеристика зависимости ошибок измерительных каналов, а получаемые результаты представляются в виде карт (диаграмм) применимости в координатах (s_2, ρ), обеспечивающих объединение диагностической информации с гарантией «не ухудшить» качество принимаемых решений при введении дополнительного канала наблюдения.

Методика проведения вычислительного эксперимента

Для верификации разработанных теоретических положений и оценки эффективности предложенных подходов к объединению разноточных диагностических каналов реализован параметрический вычислительный эксперимент. Эксперимент основан на имитационном моделировании двух измерительных каналов, обеспечивающих наблюдение одной и той же скрытой (латентной) диагностической переменной X в условиях наличия коррелированных погрешностей.

Численные параметры генерации выборочных совокупностей, модель отклонения, объемы выборок, допустимая вероятность ложной тревоги α_0, весовые коэффициенты риска $\gamma_{\text{лт}}$ и $\gamma_{\text{пр}}$, а также диапазоны варьирования параметров s_2 и ρ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры вычислительного эксперимента

Параметр	Значение
Зерно генератора случайных чисел	123
Объём выборки для режима «норма»	200000
Объём выборки для режима «отклонение»	50000
Модель отклонения	Сдвиг среднего
Параметр отклонения μ (средняя величина сдвига)	2,5
Допустимая вероятность ложных тревог α_0	0,001
Весовой коэффициент ложной тревоги $\gamma_{\text{лт}}$	1,0
Весовой коэффициент пропуска дефекта $\gamma_{\text{пр}}$	50,0
Относительная погрешность первого канала, s_1	1,0
Диапазон варьирования s_2 (второй канал)	0,50…3,00; шаг≈0,10; N=26
Диапазон варьирования ρ	0,00…0,95; шаг≈0,05; N=20
Правило принятия решения о тревоге	Двустороннее: (|Z| ≥ τ)
Выбор весового коэффициента w	Аналитическая оптимизация, $w \in [0,1]$

В номинальном (бездефектном) режиме скрытая переменная состояния моделируется нормальным распределением $X \sim \mathcal{N}(0,1)$. Режим «отклонение», соответствующий развитию дефекта, задается сдвигом математического ожидания на величину $\pm\mu$ (знак сдвига выбирается случайным образом), что имитирует устойчивое смещение диагностического индикатора при возникновении неисправности. Для каждого канала $j = 1,2$ наблюдение формируется в соответствии с моделью:

$$Z_j = X + \varepsilon_j,$$

где ε_j – аддитивная погрешность измерения с дисперсией σ_j^2, причем зависимость ошибок задается коэффициентом корреляции ρ согласно выражению (2).

Относительная точность каналов характеризуется параметрами $s_j = \sigma_j/\sigma_X$; поскольку в эксперименте

принято $\sigma_X = 1$, поэтому выполняется соотношение $s_j \equiv \sigma_j$.

Сравнение альтернативных схем объединения диагностической информации производится при фиксированном эксплуатационном ограничении на частоту ложных тревог $\alpha = \alpha_0$. Для каждой исследуемой схемы пороговое значение τ подбирается по выборке, соответствующей номинальному режиму, таким образом, чтобы обеспечить выполнение условия $\mathrm{P}(A \mid \text{норма}) = \alpha_0$ в соответствии с (4). Решение о наличии неисправности принимается по двустороннему правилу, что гарантирует одинаковую чувствительность к отклонениям диагностического показателя как в положительную, так и в отрицательную сторону. После калибровки порога по номинальному режиму для каждого состояния «отклонение» оценивается вероятность пропуска дефекта $\beta = \mathrm{P}(\bar{A} \mid \text{отклонение})$ и вычисляется интегральный показатель риска J согласно (5).

В рамках эксперимента рассматриваются три класса решающих правил.

1. Базовое решение – диагностирование осуществляется исключительно по первому (наиболее точному) каналу, что служит опорным вариантом для сравнения;

2. Объединение «до порога» – формируется линейная комбинация наблюдений $Z(w)$ по формуле (6) с весовым коэффициентом $w \in [0,1]$, значение которого определяется аналитически с последующим ограничением единичным интервалом;

3. Объединение «после порога» – для каждого канала вырабатываются локальные бинарные решения A_1, A_2 в соответствии с (7), после чего применяются логические правила «И» ($A = A_1 \wedge A_2$) и «ИЛИ» ($A = A_1 \vee A_2$) согласно (8).

Эксперимент реализован путем перебора узлов регулярной сетки в пространстве параметров (s_2, ρ) при фиксированном значении s_1. Результаты моделирования представлены в форме карт оптимального весового коэффициента $w^*(s_2, \rho)$, карт выигрыша/проигрыша по интегральному риску $\Delta J(s_2, \rho)$, вычисляемого согласно (9), а также границы применимости $\rho_{\text{кр}}(s_2)$, определяемой как максимальное значение коэффициента корреляции, при котором объединение после порога не приводит к ухудшению качества диагностирования относительно использования только первого канала ($\Delta J \leq 0$).

Результаты

Экспериментальное исследование выполнено при фиксированной для всех рассматриваемых схем допустимой вероятности ложной тревоги α_0, что обеспечивает корректность сопоставления интегральных рисков J. При таком подходе различия в значениях J обусловлены преимущественно изменением вероятности пропуска дефекта β, а не различиями в «жесткости» установленных пороговых уровней.

Карта оптимального весового коэффициента $w^*(s_2, \rho)$ для объединения «до порога», представлена на рис. 1. В области $s_2<1$, где второй канал характеризуется более высокой точностью по сравнению с первым, оптимальный вес w^* принимает малые значения, что свидетельствует о преимущественной опоре объединенного показателя на второй, более точный канал. При $s_2 > 1$ (второй канал грубее первого) величина w^* возрастает и с увеличением коэффициента корреляции ρ асимптотически стремится к единице, что соответствует практическому исключению грубого и/или сильно коррелированного канала из процесса формирования итогового решения. Такая зависимость служит наглядной интерпретацией механизма автоматического ограничения вклада второго канала при неблагоприятном сочетании параметров разноточности и корреляции погрешностей (рис. 1).

На рис. 2 представлена карта разности интегральных рисков ΔJ для стратегии объединения до порога относительно базового решения по первому каналу.

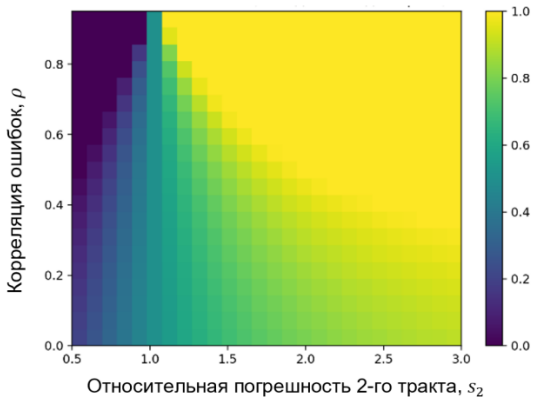


Рис. 1. Карта оптимального весового коэффициента $w^*(s_2, \rho)$ для стратегии объединения «до порога»

В широкой области пространства параметров наблюдается положительный эффект от объединения, выражающийся в снижении интегрального риска ($\Delta J < 0$), тогда как при росте s_2 и ρ эффект уменьшается и переходит в область $\Delta J \approx 0$. Такое поведение полностью согласуется с характером изменения оптимального веса w^* (рис. 1): при неблагоприятных значениях параметров весовой коэффициент смещается к единице, фактически устраняя влияние второго канала.

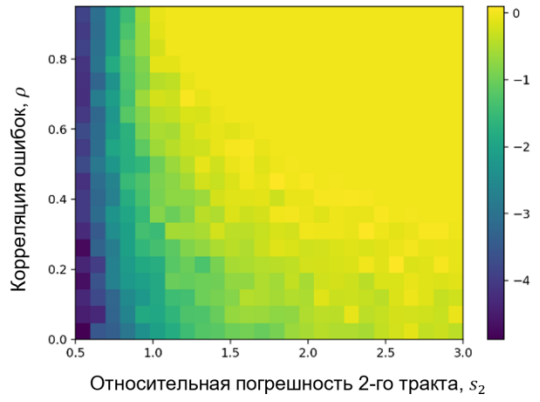


Рис. 2. Карта разности интегральных рисков ΔJ для стратегии объединения «до порога» относительно первого канала

Для стратегии объединения «после порога» наблюдается принципиально иная картина: при

использовании грубого второго канала появляются выраженные области ухудшения качества диагностирования. На рис. 3 приведена карта ΔJ для стратегии объединения «после порога», где в каждой точке пространства параметров выбирается лучшее из двух логических правил («И» либо «ИЛИ»). В области $s_2 < 1$ введение второго канала улучшает качество принимаемых решений даже при высокой корреляции погрешностей. Однако при переходе в область $s_2 > 1$ формируется область, в которой объединение «после порога» приводит к увеличению интегрального риска ($\Delta J > 0$). Это подтверждается численными значениями параметров, так при $s_2 = 3{,}0$ и $\rho = 0{,}6$ применение стратегии объединения «после порога» увеличивает интегральный риск J по сравнению с использованием только первого канала.

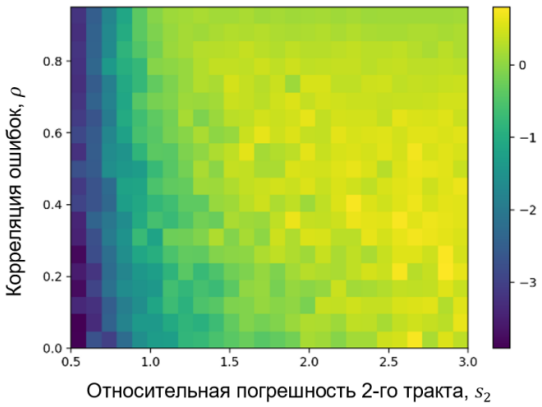


Рис. 3. Карта разности интегральных рисков ΔJ для стратегии объединения «после порога» относительно первого канала

Детальный анализ влияния корреляции погрешностей при фиксированных значениях точности второго канала представлен на рис. 4–6. Для случая $s_2 = 0{,}5$ (рис. 4), когда второй канал точнее первого, все рассматриваемые схемы объединения обеспечивают снижение интегрального риска ($\Delta J < 0$), причем стратегия объединения «до порога» обеспечивает наибольшее снижение риска.

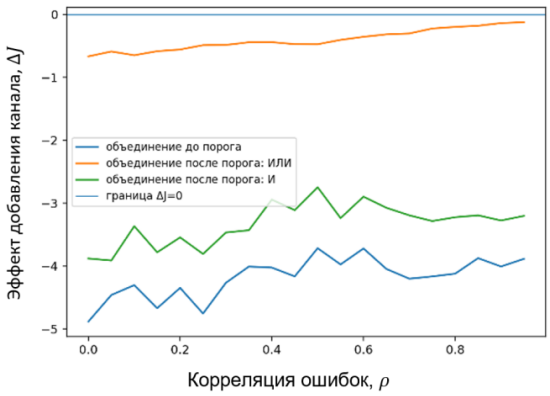


Рис. 4. Зависимость $\Delta J(\rho)$ при фиксированном значении $s_2 = 0{,}5$

При $s_2 = 1{,}8$ (рис. 5) правило «ИЛИ» приводит к ухудшению качества диагностирования, в то время как правило «И» находится вблизи границы применимости. Стратегия объединения «до порога» обеспечивает положительный эффект лишь при малых значениях коэффициента корреляции ρ и далее переходит к нейтральному режиму вследствие смещения веса к единице. При $s_2 = 3{,}0$ (рис. 6), соответствующем существенно более грубому второму каналу, объединение после порога практически во всем диапазоне ρ ухудшает интегральный риск. Стратегия объединения до порога становится практически нейтральной, фактически сводясь к решению по первому каналу.

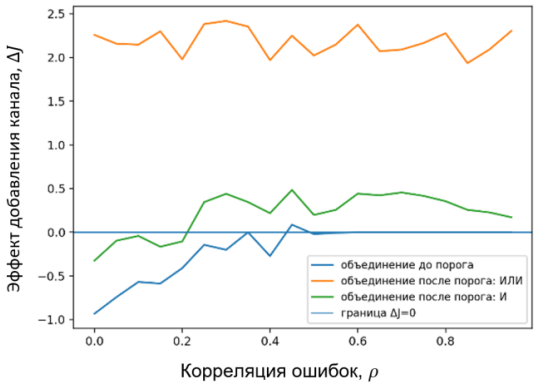


Рис. 5. Зависимость $\Delta J(\rho)$ при фиксированном значении $s_2 = 1{,}8$

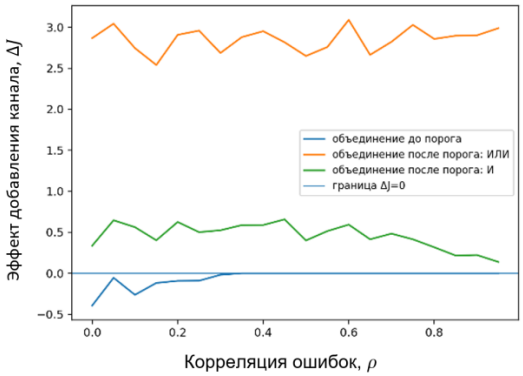


Рис. 6. Зависимость $\Delta J(\rho)$ при фиксированном значении $s_2 = 3{,}0$

Для практической интерпретации полученных результатов введено понятие границы применимости $\rho_{кр}(s_2)$, определяемой как максимальное значение коэффициента корреляции ρ, при котором объединение после порога (с выбором наилучшего из правил «И» или «ИЛИ») не приводит к ухудшению интегрального риска относительно использования только первого канала, то есть выполняется условие $\Delta J \leq 0$.

График зависимости $\rho_{кр}(s_2)$ представлен на рис. 7. Дополнительно на том же рисунке приведена «строгая» граница $\rho_{кр}$, соответствующая условию $\Delta J \leq -0{,}1$, что позволяет исключить область статистической неопределенности вблизи нулевого значения.

Полученная зависимость носит монотонно убывающий характер с ростом s_2: чем ниже точность второго канала (больше s_2), тем меньший уровень корреляции погрешностей является допустимым для того, чтобы объединение после порога обеспечивало положительный эффект. При достаточно больших значениях s_2 область улучшения качества диагностирования исчезает полностью, что формирует практически значимое правило

применимости: использование дополнительного канала в пороговых схемах объединения целесообразно лишь при выполнении условия $\rho \leq \rho_{\text{кр}}(s_2)$.

Полученная зависимость убывает с ростом s_2: чем грубее второй канал, тем меньшая корреляция ошибок допустима для того, чтобы объединение после порога давало выигрыш. При достаточно больших s_2 область улучшения исчезает полностью, что формирует правило применимости.

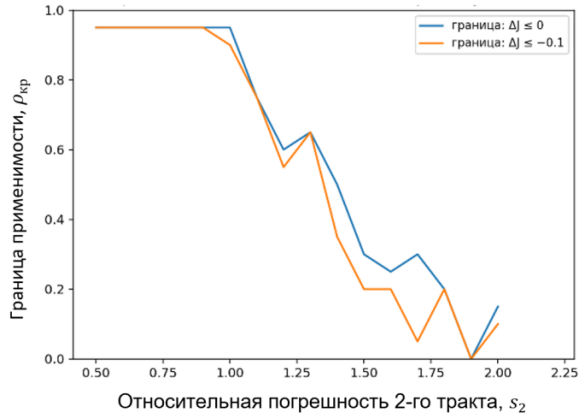


Рис. 7. Граница применимости $\rho_{кр}(s_2)$ для стратегии объединения после порога (с выбором наилучшего из правил «И» или «ИЛИ»)

Обсуждение

Проведенный анализ и построенные карты применимости выявили принципиальное различие между двумя подходами к интеграции диагностической информации: объединением на уровне данных (до порогового решения) и объединением на уровне решений (после порога). В первом случае вклад второго измерительного канала регулируется непрерывным весовым коэффициентом, что обеспечивает адаптивность схемы. При снижении точности дополнительного канала либо возрастании корреляционной связи ошибок система автоматически смещает приоритет в сторону более надежного канала, переходя в нейтральный режим, характеристики которого приближаются к базовому решению по одному каналу. Во втором случае, при пороговом объединении, происходит потеря информации о величине отклонения, поскольку дальнейшая обработка оперирует лишь бинарными исходами «норма/тревога». В условиях коррелированных ошибок второй канал зачастую не повышает достоверность финального решения, а лишь трансформирует структуру итоговой статистики. При фиксированной вероятности ложной тревоги это неизбежно ведет к росту вероятности пропуска дефекта и, как следствие, к ухудшению интегрального показателя риска, что наглядно иллюстрируют зависимости, представленные на рисунках 2–3 и 6.

С практической точки зрения эксплуатации судовых энергетических установок полученные результаты имеют особую значимость. Физическое наращивание парка датчиков зачастую лимитировано жесткими требованиями к условиям монтажа, доступности при техническом обслуживании и конструктивным ограничениям. В этой связи находит широкое распространение подход, основанный на введении дополнительных диагностических индикаторов, формируемых расчетно-аналитическим путем. Выполненные исследования показывают, что такой добавочный канал оказывается полезным лишь при выполнении двух условий: наличии достаточной точности (малой дисперсии ошибки) и ограниченной корреляции ошибок с базовым каналом. Если же дополнительный канал характеризуется низкой точностью и одновременно подвержен тем же режимным факторам и помехам, что и основной, то применение пороговых схем объединения способно не улучшить, а ухудшить качество итогового эксплуатационного решения. В данном контексте объединение до порога с адаптивной настройкой весового коэффициента представляется более «безопасной» стратегией в условиях ограниченной наблюдаемости диагностируемого процесса.

При практической реализации пороговых схем целесообразно введение граничного значения коэффициента корреляции $\rho_{\text{кр}}(s_2)$ в качестве критерия допустимости использования второго канала. Превышение данного порогового уровня корреляции ошибок свидетельствует о нецелесообразности включения дополнительного канала в контур формирования итогового решения о тревоге. Дополнительно установлено, что логика подтверждения («И») демонстрирует большую устойчивость по сравнению с правилом «ИЛИ» на преобладающей части области варьируемых параметров. Данный результат согласуется с эксплуатационной логикой: при относительно редких событиях (возникновении дефектов) и жестких ограничениях на допустимую вероятность ложной тревоги предпочтительным является требование согласованного подтверждения от нескольких каналов, нежели реакция на одиночное срабатывание.

Следует отметить ряд ограничений выполненного исследования. Дефект моделировался как смещение математического ожидания скрытого показателя состояния, тогда как в реальных условиях зарождающиеся неисправности могут проявляться в изменении дисперсии сигнала, нестационарности процессов либо наличии негауссовых выбросов. Корреляционная связь ошибок полагалась постоянной, хотя в действительности она может зависеть от режима работы двигателя и времени вследствие дрейфа характеристик как самого объекта, так и измерительной аппаратуры [25]. Тем не менее, выявленные закономерности сохраняют устойчивый прикладной смысл: полезность дополнительного канала определяется совокупностью его относительной точности и степени коррелированности ошибок, при этом пороговые схемы обнаруживают наибольшую чувствительность именно к корреляционным связям.

Заключение

В работе выполнено теоретическое и экспериментальное исследование влияния разноточности (различной дисперсии ошибок) и коррелированности погрешностей двух диагностических каналов на качество функционирования системы предиктивного обслуживания СДД в бинарной постановке задачи

распознавания состояний «норма/тревога». С целью обеспечения корректности сопоставительного анализа различных стратегий объединения информации проведен вычислительный эксперимент на регулярной сетке значений относительной точности второго канала s_2 и коэффициента корреляции ошибок ρ при фиксированной допустимой вероятности ложной тревоги α_0. Такой методический подход позволил уменьшить влияние различий в настройке пороговых уровней и обеспечить содержательную интерпретацию различий в интегральном риске J как следствия изменения вероятности пропуска дефекта β.

В результате проведенного исследования сформулированы следующие основные выводы.

1. Установлено, что объединение диагностической информации на уровне измерений (до порогового решения) при оптимальной настройке весового коэффициента демонстрирует высокую устойчивость к неблагоприятным сочетаниям параметров. Оптимальный вес w^* автоматически ограничивает вклад второго канала при возрастании корреляции ошибок ρ и/или снижении его точности (увеличении s_2). В указанных условиях объединение фактически переходит в нейтральный режим, при котором качество диагностирования не претерпевает существенного ухудшения по сравнению с использованием единственного (базового) канала.

2. Для стратегии объединения на уровне решений (после порогового преобразования) выявлены области параметров, в которых введение второго, менее точного канала приводит к парадоксальному эффекту – ухудшению интегрального показателя риска. Наибольшую чувствительность к ухудшению качества демонстрируют ситуации с умеренной и высокой корреляцией ошибок измерительных трактов. Полученный результат однозначно свидетельствует о том, что добавление дополнительного диагностического канала является целесообразным лишь при выполнении строго определенных условий применимости, определяемых совокупностью требований к точности и допустимому уровню корреляционных связей.

3. Предложен критерий применимости пороговых схем объединения в виде граничной зависимости $\rho_{кр}(s_2)$, разделяющей области улучшения и ухудшения качества диагностирования при введении второго канала. Установлено, что с ухудшением точности дополнительного канала допустимый уровень корреляции ошибок быстро снижается, а при достижении вторым каналом некоторой пороговой грубости область положительного эффекта от его использования исчезает полностью. Показано, что среди элементарных логических правил объединения после порога более высокой устойчивостью обладает правило подтверждения («И»), тогда как применение правила «ИЛИ» при грубом втором канале с высокой вероятностью приводит к неоправданному росту интегрального риска.

Статистическая достоверность полученных результатов обеспечена объемом вычислительных экспериментов: погрешность оценивания вероятности ложной тревоги при объеме выборки 200 тыс. наблюдений не превышает $8 \cdot 10^{-5}$.

Практическая значимость выполненного исследования для эксплуатации СЭУ заключается в предоставлении формализованных границ полезности дополнительных каналов контроля в условиях объективных ограничений на размещение датчиков и наличия общих для нескольких каналов источников помех. Разработанные карты применимости и аналитическое выражение для граничной корреляции позволяют обоснованно выбирать стратегию диагностического обеспечения: применять объединение до порога с адаптивной калибровкой весовых коэффициентов как «безопасный» вариант, либо отказаться от интеграции грубого и коррелированного канала в пороговых схемах принятия решений во избежание ухудшения качества предиктивного обслуживания СДД.

Литература

1. Lv Y., Xia Y., Yang X., Li Y., Li Y., Liu J., Li S.-J., Li S. Fault detection and diagnosis of marine diesel engines: A systematic review // Ocean Engineering. – 2024. – Vol. 294. – Article 116798. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.116798.
2. Жуков В. А. Актуализация экологических требований к двигателям речных пассажирских экскурсионно-прогулочных судов / В. А. Жуков, Ю. В. Яцук // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 6. — С. 913–923. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-6-913-923. — EDN QNUMFC.
3. Schinas O., Bergmann N. The Short-Term Cost of Greening the Global Fleet // Sustainability. — 2021. — Vol. 13, No. 16. — P. 9439 https://doi.org/10.3390/su13169439
4. Qu C., Zhou Z., Liu Z., Jia S. Predictive anomaly detection for marine diesel engine based on echo state network and autoencoder // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8, Suppl. 4. – pp. 998–1003. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.01.225.
5. Кулагин А.В. Диагностирование состояния судовых дизельных двигателей вероятностным методом распознавания неисправностей // Научные проблемы водного транспорта. — 2021. — № 69. — С. 109–122. DOI: 10.37890/jwt.vi69.220
6. Епихин А.И., Кондратьев С.И., Хекерт Е.В. Возможности местного и удаленного мониторинга оборудования автономного судна // Морские интеллектуальные технологии. – 2026. – № 1(1). – С. 133—138. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.014.
7. Портнова О.С., Грибиниченко М.В., Плаксин Р.А., Андрюхина П.А. Комплексная методика диагностики и наладки судового энергетического оборудования. Труды Крыловского государственного научного центра. – 2024. – 4(410). – С.132–136.
8. Velasco-Gallego C., Lazakis I. RADIS: A real-time anomaly detection intelligent system for fault diagnosis of marine machinery // Expert Systems with Applications. – 2022. – Vol. 204. – Article 117634. DOI: 10.1016/j.eswa.2022.117634.

9. Velasco-Gallego C., Lazakis I. Mar-RUL: A remaining useful life prediction approach for fault prognostics of marine machinery // Applied Ocean Research. – 2023. – Vol. 140. – Article 103735. DOI: 10.1016/j.apor.2023.103735.
10. Дышлевский В. А., Кудрявцева И. С., Науменко А. П., Рольгейзер В. А. Методы теории принятия решений как способ повышения достоверности оценки состояния технических систем // Омский научный вестник. – 2025. – №4(196). –С. 82-91. doi:10.25206/1813-8225-2025-196-82-91
11. Mwangi M.G.W., Park M.H., Chun K.W., Noh J.H., Kim C., Lee W.J. Hybrid AI-driven condition monitoring and RUL forecasting for multi-fault diagnosis in two-stroke marine diesel engines // Journal of Ocean Engineering and Science. – 2025. – Available online 4 December 2025. DOI: 10.1016/j.joes.2025.12.002.
12. Wang B., Wang Z., Yao C., Chen J., Lu L., Song E. Multi-system condition monitoring of marine engines: A unified deep learning framework introducing physical prior knowledge // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. – 2025. – Vol. 17. – Article 100698. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2025.100698.
13. Цветков Э.И., Панкин А.М. Взаимосвязь достоверности результатов технической диагностики и точности диагностических измерений // Надёжность и качество сложных систем. – 2021. – № 3(35). – С. 74–79. DOI: 10.21685/2307-4205-2021-3-9.
14. Yu Y., Karimi H.R., Gelman L., Tian J., Mei P. A novel multi-source sensor correlation adaptive fusion framework with uncertainty quantification for intelligent fault diagnosis // Reliability Engineering & System Safety. – 2026. – Vol. 267. – Article 111812. DOI: 10.1016/j.ress.2025.111812.
15. Казанцева В.В., Ожигин Д.С., Косарев Н.С., Сатбергенова А.К., Ожигина С.Б. Разработка комплексной системы геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных // Записки Горного института. – 2025. – Т. 276 (1). – С. 142-156. EDN OKPFFR
16. Afanaseva, O.; Pervukhin, D.; Khatrusov, A. Vibration-Based Condition Monitoring of Diesel Engines in Industrial Energy Applications: A Scoping Review. Energies 2025, 18, 5717. https://doi.org/10.3390/en18215717
17. Тузов Л.В., Безюков О.К., Афанасьева О.В. Вибрация судовых двигателей внутреннего сгорания: монография. — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та. — 2012. — 348 с.
18. Барышников С.О., Дмитриенко Д.В., Сахаров В.В., Чертков А.А. Модели и алгоритмы управления объектами водного транспорта в условиях цифровой трансформации: монография — СПб: Изд-во «Заневская площадь». — 2022. — 520 с.
19. Герасиди В.В., Николаев Н.И., Лисаченко А.В. Система контроля параметров работы двигателей энергетических установок судов и морской техники // Эксплуатация морского транспорта. 2021. — № 2. —С. 94-101.
20. Соловьев А. В. Системы мониторинга судовых дизелей в эксплуатации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2018. – № 1., – С. 87-92. DOI: https://doi.org/10.24143/2073-1574-2018-1-87-92
21. Грищенко Д. В. Система непрерывного мониторинга состояния и оперативной диагностики судового роторного оборудования // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2016. – № 4. – С. 54 – 62. – ISSN 2073-1574.
22. Зарипова В., Петрова И., Шейхгасанов Ш. Виртуальные датчики в автоматизированных системах управления процессом гидроочистки дизельной фракции // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2024. – № 2. – С.21-28. DOI: https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-2-21-28 (дата обращения: 12.03.2026).
23. Левшун Д.А., Левшун Д.С., Котенко И.В. Обнаружение и объяснение аномалий в индустриальных системах Интернета вещей на основе автокодировщика // Онтология проектирования. – 2025. – Т. 15, № 1. – С. 96–113. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-96-113.
24. Wang R., Chen H., Guan C. A Bayesian inference-based approach for performance prognostics towards uncertainty quantification and its applications on the marine diesel engine // ISA Transactions. – 2021. – Vol. 118. – pp. 159–173. DOI: 10.1016/j.isatra.2021.02.024.
25. Тукеев Д.Л.; Филатов И.Н.; Сказкин В.П.; Шарапов В.П.; Литвинов С.В.; Россошанский П.В.; Головлёв Д.С.; Иванов С. А.; Ткаченко В. П.; Филюстин А. Е.; Бажин Д. А. Устройство для решения задачи оценки показателей эффективности многопараметрического контроля ракетно-артиллерийского вооружения: патент на полезную модель RU 30205 U1 (Российская Федерация), МПК G06F 19/00; опубликовано 20.06.2003; 4 с.

References

1. Lv, Y., Xia, Y., Yang, X., Li, Y., Li, Y., Liu, J., Li, S.-J., and Li, S. "Fault detection and diagnosis of marine diesel engines: A systematic review." *Ocean Engineering* 294 (2024): Article 116798. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.116798.
2. Zhukov, V. A., and Yatsuk, Yu. V. "Aktualizatsiya ekologicheskikh trebovaniy k dvigatelyam rechnykh passazhirskikh ekskursionno-progulochnykh sudov" [Updating environmental requirements for engines of river passenger excursion and pleasure craft]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17, no. 6 (2025): 913–923. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-6-913-923.
3. Schinas, O., and Bergmann, N. "The Short-Term Cost of Greening the Global Fleet." *Sustainability* 13, no. 16 (2021): 9439. DOI: 10.3390/su13169439.
4. Qu, C., Zhou, Z., Liu, Z., and Jia, S. "Predictive anomaly detection for marine diesel engine based on echo state network and autoencoder." *Energy Reports* 8, Suppl. 4 (2022): 998–1003. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.01.225.
5. Kulagin, A. V. "Diagnostirovaniye sostoyaniya sudovykh dizel'nykh dvigateley veroyatnostnym metodom raspoznavaniya neispravnostey" [Diagnosing the condition of marine diesel engines using a probabilistic method of fault recognition]. *Nauchnyye problemy vodnogo transporta*, no. 69 (2021): 109–122. DOI: 10.37890/jwt.vi69.220.

6. Epikhin, Aleksey I., Kondratyev, Sergey I., and Khekert, Evgeny V. "Vozmozhnosti mestnogo i udalennogo monitoringa oborudovaniya avtonomnogo sudna" [Local and remote monitoring capabilities for autonomous vessel equipment]. *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii* 71, no. 1 (2026): 133–138. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.014.
7. Portnova, O. S., Gribinichenko, M. V., Plaksin, R. A., and Andrukhina, P. A. "Kompleksnaya metodika diagnostiki i naladki sudovogo energeticheskogo oborudovaniya" [Methodology of comprehensive diagnostics and setting up of ship power equipment]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* 410, no. 4 (2024): 132–136.
8. Velasco-Gallego, C., and Lazakis, I. "RADIS: A real-time anomaly detection intelligent system for fault diagnosis of marine machinery." *Expert Systems with Applications* 204 (2022): Article 117634. DOI: 10.1016/j.eswa.2022.117634.
9. Velasco-Gallego, C., and Lazakis, I. "Mar-RUL: A remaining useful life prediction approach for fault prognostics of marine machinery." *Applied Ocean Research* 140 (2023): Article 103735. DOI: 10.1016/j.apor.2023.103735.
10. Dyshlevsky, Vyacheslav A., Kudryavtseva, Irina S., Naumenko, Alexander P., and Rolgeizer, Varvara A. "Metody teorii prinyatiya resheniy kak sposob povysheniya dostovernosti otsenki sostoyaniya tekhnicheskikh sistem" [Methods of Decision Theory as a Way to Increase the Reliability of Assessing the State of Technical Systems]. *Omskiy nauchnyy vestnik*, no. 4 (196) (2025): 82–91. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-82-91.
11. Mwangi, M. G. W., Park, M. H., Chun, K. W., Noh, J. H., Kim, C., and Lee, W. J. "Hybrid AI-driven condition monitoring and RUL forecasting for multi-fault diagnosis in two-stroke marine diesel engines." *Journal of Ocean Engineering and Science* (2025). Published online December 4, 2025. DOI: 10.1016/j.joes.2025.12.002.
12. Wang, B., Wang, Z., Yao, C., Chen, J., Lu, L., and Song, E. "Multi-system condition monitoring of marine engines: A unified deep learning framework introducing physical prior knowledge." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 17 (2025): Article 100698. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2025.100698.
13. Tsvetkov, E. I., and Pankin, A. M. "Vzaimosvyaz' dostovernosti rezul'tatov tekhnicheskoy diagnostiki i tochnosti diagnosticheskikh izmereniy" [The relationship between the reliability of technical diagnostics results and the accuracy of diagnostic measurements]. *Nadyozhnost' i kachestvo slozhnykh sistem*, no. 3(35) (2021): 74–79. DOI: 10.21685/2307-4205-2021-3-9.
14. Yu, Y., Karimi, H. R., Gelman, L., Tian, J., and Mei, P. "A novel multi-source sensor correlation adaptive fusion framework with uncertainty quantification for intelligent fault diagnosis." *Reliability Engineering & System Safety* 267 (2026): Article 111812. DOI: 10.1016/j.ress.2025.111812.
15. Kazantseva, V. V., Ozhigin, D. S., Kosarev, N. S., Satbergenova, A. K., and Ozhigina, S. B. "Razrabotka kompleksnoy sistemy geotekhnicheskogo monitoringa tekhnogennykh ob"yektov na osnove geoprostranstvennykh dannykh" [Development of an integrated system for geotechnical monitoring of technogenic objects based on geospatial data]. *Zapiski Gornogo instituta* 276, no. 1 (2025): 142–156.
16. Afanaseva, O.; Pervukhin, D.; Khatrusov, A. Vibration-Based Condition Monitoring of Diesel Engines in Industrial Energy Applications: A Scoping Review. Energies, 2025, 18, 5717. https://doi.org/10.3390/en18215717
17. Tuzov, L. V., Bezyukov, O. K., and Afanasyeva, O. V. *Vibratsiya sudovykh dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Vibration of marine internal combustion engines]. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House, 2012. 348 p.
18. Baryshnikov, S. O., Dmitrienko, D. V., Sakharov, V. V., and Chertkov, A. A. *Modeli i algoritmy upravleniya ob"yektami vodnogo transporta v usloviyakh tsifrovoy transformatsii* [Models and algorithms for managing water transport objects in the context of digital transformation]. St. Petersburg: Zanevskaya Ploshchad Publishing House, 2022. 520 p.
19. Gerasidi, V. V., Nikolaev, N. I., and Lisachenko, A. V. "Sistema kontrolya parametrov raboty dvigateley energeticheskikh ustanovok sudov i morskoy tekhniki" [System for monitoring the operating parameters of engines of power plants of ships and marine equipment]. *Ekspluatatsiya morskogo transporta*, no. 2 (2021): 94–101.
20. Solovyev, Alexey V. "Sistemy monitoringa sudovykh dizeley v ekspluatatsii" [Monitoring systems for marine diesel engines in operation]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, no. 1 (2018): 87–92. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-87-92.
21. Grishchenko, D. V. "Sistema nepreryvnogo monitoringa sostoyaniya i operativnoy diagnostiki sudovogo rotornogo oborudovaniya" [System of continuous monitoring and operational diagnostics of ship rotary equipment]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, no. 4 (2016): 54–62.
22. Zaripova, V., Petrova, I., and Sheikhgasanov, Sh. "Virtual'nyye datchiki v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya protsessom gidroochistki dizel'noy fraktsii" [Virtual sensors in automated control systems for the diesel fraction hydrotreating process]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika, no. 2 (2024): 21–28. DOI: 10.24143/2072-9502-2024-2-21-28.
23. Levshun, D. A., Levshun, D. S., and Kotenko, I. V. "Obnaruzheniye i ob"yasneniye anomaliy v industrial'nykh sistemakh Interneta veshchey na osnove avtokodirovshchika" [Detection and explanation of anomalies in industrial Internet of Things systems based on an autoencoder]. Ontologiya proyektirovaniya 15, no. 1 (2025): 96–113. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-96-113.
24. Wang, R., Chen, H., and Guan, C. "A Bayesian inference-based approach for performance prognostics towards uncertainty quantification and its applications on the marine diesel engine." ISA Transactions 118 (2021): 159–173. DOI: 10.1016/j.isatra.2021.02.024.
25. Tukeev, D.L., Filatov, I.N., Skazkin, V.P., Sharapov, V.P., Litvinov, S.V., Rossoshanskiy, P.V., Golovlev, D.S., Ivanov, S.A., Tkachenko, V.P., Filyustin, A.E. and Bazhin, D.A. Device for Solving the Problem of Evaluating the Efficiency Indicators of Multiparameter Control of Rocket and Artillery Weapons: Russian Federation Utility Model Patent RU 30205 U1, IPC G06F 19/00; published 20 June 2003; 4 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

Афанасьев Михаил Петрович, доцент кафедры судостроения и энергетических установок, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: mikhailafanasev@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-7359-9558

Mikhail P. Afanasyev, assistant professor of the Department of Shipbuilding and Power Plants, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7 Dvinskaya street, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: mikhailafanasev@yandex.ru

Афанасьева Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры системного анализа и управления, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106, Санкт-Петербург, 21 линия В.О., д. 2, e-mail: afanaseva_ov@pers.spmi.ru, ORCID: 0000-0003-3169-4781

Olga V. Afanaseva, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of System Analysis and Control, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russian Federation, e-mail: afanaseva_ov@pers.spmi.ru

Хатрусов Александр Сергеевич, студент кафедры системного анализа и управления, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106, Санкт-Петербург, 21 линия В. О., д.2, e-mail: me@hatrusov.ru, ORCID: 0009-0009-4279-4973

Aleksandr S. Khatrusov, student of the Department of System Analysis and Control, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russian Federation, e-mail: me@hatrusov.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 24.05.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.06.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 17.06.2026.

Научная статья
УДК 624.131:532.546
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.038

Температурные поля и обобщенные теплогидравлические характеристики пористого слоя произвольной морфологии при фильтрации жидкой фазы

Сергеев М.С.[1] sergeevms1988@mail.ru, **Алексин Е.Н.**[2] aleksin@smtu.ru, **Малинова Е.А.**[2] smtuekaterina@mail.ru
[1]КСК СП,[2]Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье анализируются процессы теплообмена и гидравлического сопротивления при фильтрации жидкой фазы через пористый слой произвольной морфологии. Актуальность работы обусловлена широким применением пористых материалов для интенсификации теплообмена в энергетических установках и отсутствием единых аналитических зависимостей, справедливых для различных типов пористых структур. В основе предлагаемого подхода лежит аналитическое решение системы дифференциальных уравнений теплопереноса с последующей параметризацией морфологических особенностей через вязкостный и инерционный коэффициенты, а также эквивалентный диаметр порового канала. Для сферических засыпок, параллельных волокон и сетчатых укладок приведены конкретные расчетные соотношения. Достоверность результатов обоснована согласованием с известными экспериментальными данными в предельных случаях малых чисел Рейнольдса. Предложенный метод позволяет управлять теплогидравлическими характеристиками при формировании пористого слоя и может быть использован в математических моделях проектирования теплообменных устройств с адаптивными топологическими характеристиками**.**
Ключевые слова: пористый слой, фильтрация жидкости, температурные поля, теплогидравлические характеристики, перепад давления, аналитическая модель.
Для цитирования: Сергеев М.С., Алексин Е.Н., Малинова Е.А., Температурные поля и обобщенные теплогидравлические характеристики пористого слоя произвольной морфологии при фильтрации жидкой фазы, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 124—130. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.038

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.038

Temperature Fields and Generalized Thermohydraulic Characteristics of a Porous Layer of Arbitrary Morphology during Liquid Phase Filtration

Maximilian S. Sergeev[1] sergeevms1988@mail.ru, **Evgeniy N. Aleksin**[2] aleksin@smtu.ru,
Ekaterina A. Malinova[2] smtuekaterina@mail.ru
[1]«KSK SP» LLC, St. Petersburg, Russian Federation, [2]Saint Petersburg State Marine Technical University, Russian Federation

Abstract. The paper analyzes heat transfer and hydraulic resistance processes during liquid phase filtration through a porous layer of arbitrary morphology. The relevance of the work is due to the widespread use of porous materials for heat transfer intensification in power plants and the lack of unified analytical relationships valid for different types of porous structures. The proposed approach is based on an analytical solution of a system of heat transfer differential equations followed by parameterization of morphological features through viscous and inertial coefficients, as well as the equivalent pore channel diameter. Specific calculation relations are provided for spherical packings, parallel fibers, and screen packings. The reliability of the results is validated by agreement with known experimental data in the limit of low Reynolds numbers. The proposed method allows controlling the thermal-hydraulic characteristics when forming a porous layer and can be used in mathematical models for designing heat exchange devices with adaptive topological characteristics.
Keywords: porous layer, liquid filtration, temperature fields, thermohydraulic characteristics, pressure drop, analytical model.
For citation: Maximilian S. Sergeev, Evgeniy N. Aleksin, Ekaterina A. Malinova, Temperature fields and generalized thermohydraulic characteristics of a porous layer of arbitrary morphology during liquid phase filtration, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 124—130. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.038

Введение

Пористые материалы находят все большее применение в современных энергетических установках. Теплонапряженные элементы энергетических установок требуют высокоэффективных способов интенсификации теплообмена и применение пористых материалов позволяет успешно справиться с данной задачей.

Высокая интенсивность теплообмена между пористым слоем и протекающим сквозь него теплоносителем достигается за счет развитой поверхности их соприкосновения. Широкий диапазон структурных, теплофизических, гидравлических, химических, оптических и других свойств пористых материалов, простота изготовления из них элементов конструкций, высокая интенсивность теплообмена – все это дает возможность использовать пористые теплообменные элементы в различных экстремальных условиях [1].

© Сергеев М.С., Алексин Е.Н., Малинова Е.А. 2026

Так пористый слой применяется для реализации транспирационного охлаждения конструкций, на которые воздействуют внешние конвективные или лучистые потоки высокой плотности, в лопатках двигателей и газовых турбин, лазерных зеркалах, в пористых теплообменных аппаратах, химических реакторах.

Пористый слой используется для ускорения протекания химических реакций в потоке теплоносителя, для организации разложения однокомпонентного топлива в газогенераторах ракетных двигателей, в качестве фильтра и теплового экрана в криосорбционной панели вакуумных насосов.

Высокопористый ячеистый слой эффективно применяется в качестве фильтрующих элементов, в устройствах для разделения газовых и конденсированных фаз, электрических аккумуляторах повышенной емкости, в газовых форсунках, системах дожига топлива, в устройствах демпфирования волн, в платформах для выращивания биологически активных систем, в экранирующих элементах импульсных источников [2].

Значительный интерес представляет реализация возможности оптимизации процессов тепло-массообмена в энергетических установках в случае создания и применения поверхностей теплообмена с адаптивными топологическими характеристиками (характеристики, которые могут адаптироваться под различные теплогидравлические режимы). Теплопередающие поверхности с перечисленными выше свойствами могут быть получены путем использования различных засыпок, комбинирования засыпок со вставками из высокопористого ячеистого материала и другими комбинациями элементов, образующих динамический пористый слой.

Морфологическая классификация пористого слоя

Структуры, формирующие пористый слой, делятся на упорядоченные и неупорядоченные (хаотические структуры).

К первым относятся щеточные, вафельные, щелевые, перекрестные (скрещивающиеся, компланарные) микроканалы, шаровые засыпки, наборы перфорированных пластин [3].

Ко второму типу относятся сетчатые материалы, образованные пакетами спеченных (паянных) металлических сеток различного плетения, пружинные вставки, волокнистые материалы, порошковые или зерновые структуры, высокопористые проницаемые ячеистые материалы и т.д. [3].

Также, пористые структуры могут быть разделены на: системы сложения (корпускулярные структуры) и системы вычитания (губчатые структуры). Образование первых происходит сложением большого числа отдельных элементов структуры. Развитие структур вычитания может быть результатом топохимических превращений твердых веществ, пиролитического их разложения и др. [4].

Основные цели работы:

Основной целью данной работы является получение выражений для $\Delta T = T_s - T_f$, $\Delta T_f/L$, $\Delta P/L$, и критериальных зависимостей Nu_w, Nu_{eq}, Bi для системы, состоящей из пористого слоя произвольной морфологии и протекающей через него жидкой фазы.

Обобщение результатов на пористый слой с произвольной морфологией открывает возможности получения расчетных оценок, справедливых для широкого диапазона режимов и для многих значимых практических приложений, в том числе и для эффективного управления теплогидравлическими процессами в пористом слое.

В работе использовались подходы, изложенные в ключевых публикациях [5], [6] и [8].

Постановка задачи и основные допущения:

- рассматривается процесс теплообмена между жидкой фазой, движущейся со средней скоростью w, и уложенным на участке канала длиной L пористым слоем. Учет влияния формы сечения канала осуществляется за счет изменения значения безразмерного показателя γ. Более подробное описание показателя γ приведено ниже по тексту;
- естественной конвекцией и передачей теплоты излучением можно пренебречь;
- теплофизические характеристики охладителя и пористого слоя не зависят от температуры;
- течение жидкой фазы и теплопередача в канале являются полностью установившимися.

Условное изображение пористого слоя в канале с протекающей сквозь него жидкой фазой представлено на рисунке 1.

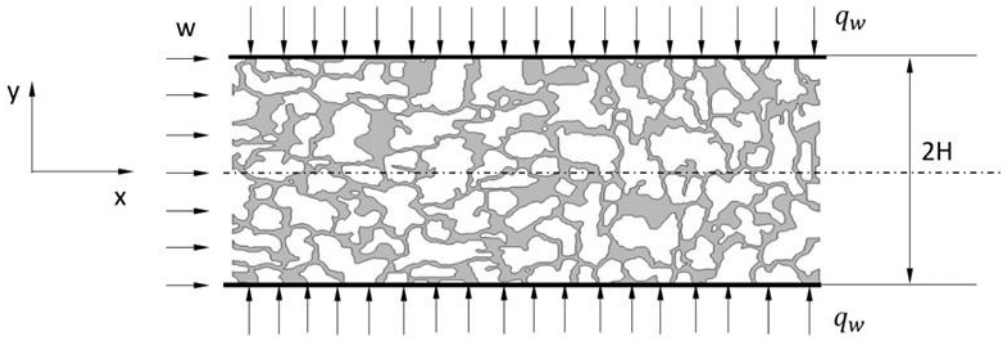


Рис. 1. Условное изображение пористого слоя в канале с протекающей через него жидкой фазой

Запишем систему дифференциальных уравнений, описывающую процесс теплообмена между пористым слоем и жидкой фазой.

$$\lambda_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} + \alpha_V (T_s - T_f) = \rho c_p w \frac{\partial T_f}{\partial x},$$
$$\lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} - \alpha_V (T_s - T_f) = 0, \quad (1)$$

Совокупность граничных условий для приведенной выше системы имеет вид.

$$T_f(H) = T_s(H) = T_w, \ \frac{\partial T_f(0)}{\partial y} = \frac{\partial T_s(0)}{\partial y} = 0,$$
$$q_w = \lambda_f \frac{\partial T_f(H)}{\partial y} + \lambda_s \frac{\partial T_s(H)}{\partial y}, \quad (2)$$

где λ_s, λ_f – эффективные теплопроводности пористого слоя и жидкой фазы, Вт/мК.

Необходимо отметить, что коэффициенты λ_s, λ_f зависят от пористости Π и выбор конкретных зависимостей $\lambda_s = \lambda_s(\Pi)$ и $\lambda_f = \lambda_f(\Pi)$ из множества имеющихся моделей сопряжен со значительными трудностями, что требует дополнительных исследований.

Для унификации расчетной модели был введен безразмерный показатель сечения канала γ.

$$\gamma = \frac{D_\Gamma}{4H}, \quad (3)$$

где $\gamma = 1$ – канал сформированный двумя параллельными пластинами, удаленными друг от друга на расстояние $2H$, $\gamma = 1/2$ – канал круглого сечения.

D_Γ – гидравлический диаметр канала, м.

Введем следующие безразмерные переменные.

$$\theta_s = \gamma \frac{\lambda_s (T_s - T_w)}{H q_w}, \ \theta_f = \gamma \frac{\lambda_s (T_f - T_w)}{H q_w}, \ \eta = \frac{y}{H}, \ \overline{w} = \frac{w}{w} = 1, \quad (4)$$

Запишем уравнение теплового баланса для двух бесконечно близких сечений пористого слоя и подводимой от стенки теплоты $q_w P dx$.

$$q_w P dx = \rho c_p w \frac{\partial T_f}{\partial x} S dx, \ \text{или} \ q_w = \rho c_p w \frac{\partial T_f}{\partial x} \gamma H, \quad (5)$$

где P – периметр канала, м; S – площадь сечения канала, м^2.

Используя уравнения системы (1) и выражения (4) - (5) получим следующую совокупность дифференциальных уравнений в безразмерной форме.

$$\frac{\partial^4 \theta_s}{\partial \eta^4} - \frac{(\lambda+1)}{\lambda} Bi \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial \eta^2} = -\frac{\overline{w} Bi}{\gamma \lambda},$$
$$\theta_f = \theta_s - \frac{\gamma}{Bi} \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial \eta^2}, \quad (6)$$

Граничные условия для первого уравнения из совокупности (6) имеют вид.

$$\theta_s(1) = \frac{\partial \theta_s(0)}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 \theta_s(1)}{\partial \eta^2} = \frac{\partial^3 \theta_s(0)}{\partial \eta^3} = 0, \quad (7)$$

Решая первое уравнение (6) в сочетании с граничными условиями (7), и возвращаясь к размерным переменным, получим выражение для разности температур пористого слоя T_s и жидкой фазы T_f.

$$(T_s - T_f) = \frac{\overline{w} H q_w}{\lambda_s (\lambda+1) Bi} \left(1 - \frac{ch\sqrt{\mu} y/H}{ch\sqrt{\mu}}\right), \ \text{или} \ (T_s - T_f) = \frac{N}{\mu} \left(1 - \frac{ch\sqrt{\mu} y/H}{ch\sqrt{\mu}}\right), \quad (8)$$

где

$$\mu = \frac{(\lambda+1)}{\gamma \lambda} Bi, \quad N = \frac{\overline{w} H q_w}{\gamma \lambda_s \lambda} = \frac{\overline{w} H q_w}{\gamma \lambda_f}, \quad \lambda = \frac{\lambda_f}{\lambda_s},$$

В формуле (8) число Bi присутствует в явном виде. Далее сосредоточимся на переходе от числа Bi к параметрам A и B (вязкостный и инерционный коэффициенты пористого слоя) и тем сам обобщим выражение (8) на произвольный пористый слой.

В порах преобладают струйные и отрывные течения, для которых характерна высокая степень изотропности пульсационных характеристик, поэтому среднюю теплоотдачу от поверхности частиц пористого слоя можно определить при помощи выражения [6]:

$$\mathrm{St}_* = \mathrm{St}_k = \frac{\alpha}{\rho c_p w_k} = \frac{1}{K_1 \sqrt{\frac{\xi}{8}} + K_2 (\mathrm{Pr}^{2/3} - 1)} = \frac{\mathrm{Pr}^{-2/3}}{K_2} \varphi(\mathrm{Pr}, \mathrm{Re}_k), \quad (9)$$

где

$$\varphi = 1 + \mathrm{Pr}^{-2/3} \left(2{,}5 \left(\frac{K_1}{K_2}\right) ln Re_k - 1\right),$$

Высокая степень изотропности пульсационных характеристик объясняет справедливость равенства $\mathrm{St}_* = \mathrm{St}_k$, которое выполняется за счет равнозначности динамической скорости (скорости трения) w_* и микромасштаба скорости А.Н. Колмогорова w_k.

В таком случае связь между числами Рейнольдса Re_k и Re_{eq} имеет вид.

$$Re_k = \frac{w_k d_{eq}}{\nu} = c_\vartheta \left(\xi_{eq} \frac{Re_{eq}^3}{2}\right)^{1/4}, \quad (10)$$

Используя зависимости (9)-(10) получим искомое выражение для числа Нуссельта в пористом слое.

$$Nu_{eq} = K \left(\xi_{eq} Re_{eq}^3\right)^{1/4} Pr^{1/3}, \quad (11)$$

$$Nu_{eq} = \frac{\alpha_s d_{eq}}{\lambda_f}, \quad Re_{eq} = \frac{w_\text{п} d_{eq}}{\nu}, \quad K = 0{,}0662 c_\vartheta \varphi,$$
$$Bi = \frac{\alpha_V H^2 \gamma}{\gamma \lambda_s} = \frac{\alpha_s s H^2 \gamma}{\lambda_s},$$

где s – удельная площадь внутренней поверхности проницаемой среды, эффективная скорость течения в поровом канале $w_\text{п} = w/\Pi$.

В работе [6] также показано, что при числе $Pr \geq 1$, значения постоянной лежат в диапазоне $K = 0{,}13 - 0{,}21$, при значении постоянной $c_\vartheta = 2 - 3$, поскольку значение функции $\varphi \to 1$.

Коэффициент K практически постоянен и равен $K = 0{,}2$ для $Pr > 10$. В области меньших чисел

Прандтля (до 0,7) величина K уменьшается с ростом числа Рейнольдса от 0,2 до 0,1. Для грубых оценок достаточно положить $K = 0{,}145$ для всех пористых сред и чисел Прандтля [7].

Следующим шагом в череде рассуждений будет получение выражения для эквивалентного коэффициента гидравлического сопротивления ξ_{eq}.

Запишем выражение для потерь давления по длине порового канала:

$$\Delta p = \xi_{eq} \frac{L}{d_{eq}} \frac{\rho w_{\text{п}}^2}{2}, \quad (12)$$

Выражение для модифицированного закона Дарси:

$$\frac{\Delta p}{L} = A\eta w + B\rho w^2, \quad (13)$$

или

$$\frac{\Delta p}{L} = A\eta \Pi w_{\text{п}} + B\rho \Pi^2 w_{\text{п}}^2, \quad (14)$$

На основании выражений (12)-(14) получим зависимость для обобщенного коэффициента сопротивления [8].

$$\xi_{eq} = \frac{2A\Pi d_{eq}^2}{Re_{eq}} + 2B\Pi^2 d_{eq}, \quad (15)$$

Выражение для перепада давления $\Delta P/L$ по длине порового канала принимает следующий вид.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{1}{2}\frac{\rho v^2}{d_{eq}^3}\xi_{eq} Re_{eq}^2, \quad (16)$$

где ν – кинематическая вязкость, м^2/с.

Используя связь критериев Bi и Nu_{eq}, а также (15), получим искомое выражение для разницы температур пористого слоя и жидкой фазы.

$$\left(T_s - T_f\right) = \frac{\overline{w} d_{eq} q_w}{\lambda_f(\lambda+1)K\left(\xi_{eq} Re_{eq}^3\right)^{1/4} Pr^{1/3} sH}\left(1 - \frac{ch\sqrt{\mu}y/H}{ch\sqrt{\mu}}\right), \quad (17)$$

Зависимости для температур T_s, T_f могут быть получены из выражений (4) и (8).

$$T_s = Ix + J + \frac{\overline{w} H q_w}{\gamma\lambda_s\mu(\lambda+1)}\left(1 - \frac{ch\sqrt{\mu}y/H}{ch\sqrt{\mu}}\right) - \frac{\overline{w} H q_w}{2\gamma\lambda_s(\lambda+1)}\left(1 - \left(\frac{y}{H}\right)^2\right), \quad (18)$$

$$T_f = Ix + J + \frac{\overline{w} H q_w}{\lambda_s\mu}\left(1 - \frac{ch\sqrt{\mu}y/H}{ch\sqrt{\mu}}\right)\left(\frac{1}{\lambda+1} - \frac{1}{\lambda}\right) - \frac{\overline{w} H q_w}{2\lambda_s(\lambda+1)}\left(1 - \left(\frac{y}{H}\right)^2\right), \quad (19)$$

где I, J – произвольные постоянные, значения которых могут быть получены путем определения температуры жидкой фазы на входе в пористый слой.

Комплекс μ зависит от λ, Re_{eq}, Pr, d_{eq} и $\mu \to 0$ при $Re_{eq} \to 0$.

Найдем предел выражения (8) при стремлении $\mu \to 0$.

$$\lim_{\mu\to 0}\left(T_s - T_f\right) = \lim_{\mu\to 0}\frac{N}{\mu}\left(1 - \frac{ch\sqrt{\mu}y/H}{ch\sqrt{\mu}}\right) = \frac{N}{2}\left(1 - \frac{y^2}{H^2}\right), \quad (20)$$

при $y = 0$ $\lim_{\mu\to 0}\left(T_s - T_f\right) = \lim_{\mu\to 0}\frac{N}{\mu}\left(1 - \frac{1}{ch\sqrt{\mu}}\right) = \frac{N}{2}$,

Выражения для коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности стенки α_w канала и соответствующего числа Нуссельта могут быть представлены в виде.

$$\alpha_w = \frac{q_w}{T_w - \langle T_f\rangle}, \quad (21)$$

$$Nu_w = \frac{\alpha_w d_{eq}}{\lambda_f} = \frac{q_w d_{eq}}{(T_w - \langle T_f\rangle)\lambda_f}, \quad (22)$$

где $\langle T_f\rangle$ – температура охладителя, осредненная по ширине канала, К.

Зависимость (5) в связке с приведенными по тексту безразмерными комплексами Pr, Re_{eq} дает выражение для перепада температуры T_f по длине пористого канала L.

$$\frac{\Delta T_f}{L} = \frac{d_{eq}\cdot q_w}{\gamma H\Pi\cdot\lambda_f Pr\cdot Re_{eq}}, \quad (23)$$

Некоторые выражения для параметров A, B, d_{eq}, s

Для укладок сферических частиц связь гидравлического диаметра и среднего диаметра частиц имеет вид [8]:

$$d_{eq} = \sqrt{\Pi}\left(\frac{\Pi}{1-\Pi}\right)d_P, \quad (24)$$

Также, согласно [8], выражение для удельной площади внутренней поверхности пористого слоя определяется как

$$s = \frac{6(1-\Pi)}{d_P}, \quad (25)$$

Соотношения для коэффициентов A и B по Эргуну.

$$A = \frac{150(1-\Pi)^2}{d_p^2\Pi^3}, \qquad B = \frac{1{,}75(1-\Pi)}{d_p\Pi^3}, \quad (26)$$

Используя выражения (24), (26) приведем зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ξ_{eq} от числа Re_{eq} и пористости Π для укладок из сферических частиц.

$$\xi_{eq} = \frac{300\Pi}{Re_{eq}} + 3{,}5\sqrt{\Pi}, \quad (27)$$

Следует отметить, что значение пористости Π для укладок сферических частиц находится в диапазоне $\Pi = 0{,}26 - 0{,}48$ и выражения (24), (26) являются справедливыми для данного диапазона.

Согласно [9], характеристики пористого слоя, состоящего из параллельных волокон, имеют вид.

$$s = \frac{4(1-\Pi)}{d_P}, \qquad d_{eq} = \Pi\left(\frac{\Pi}{1-\Pi}\right) d_P, \qquad (28)$$

Для пористого слоя, состоящего из параллельных листов.

$$s = \frac{2(1-\Pi)}{d_P}, \qquad d_{eq} = \Pi\left(\frac{\Pi}{1-\Pi}\right) d_P, \qquad (29)$$

Для укладок из сеток связь гидравлического диаметра и среднего диаметра волокон имеет вид [9]:

$$d_{eq} = \Pi(1-\Pi) d_P, \qquad (30)$$

В работе [10], применительно к волоконно-сетчатым материалам, было показано, что связь эквивалентного диаметра порового канала d_{eq} с вязкостным коэффициентом A описывается следующей формулой.

$$d_{eq} = \frac{13{,}4}{\sqrt{A}}, \qquad (31)$$

На рисунке 2 приведены графики, иллюстрирующие изменение перепада температуры ΔT_f вдоль пористого слоя протяженностью L в зависимости от числа Re_{eq}.

Рассматриваются три конфигурации пористого слоя: сферические частицы (засыпки), параллельные волокна и укладки из сеток.

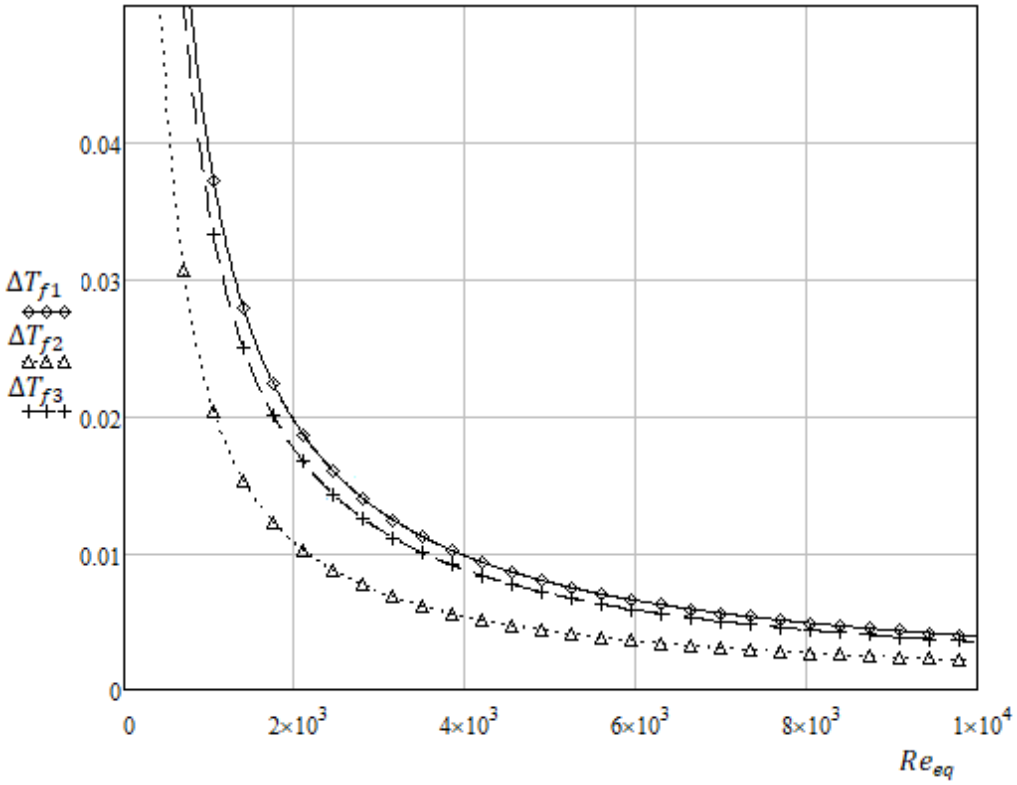


Рис. 2. Перепад температуры ΔT_f вдоль пористого слоя протяженностью L в зависимости от числа Re_{eq} ◊ – сферические частицы (засыпки), Δ – параллельные волокна, + – укладки из сеток

Приведенные выше графики были построены для произвольно выбранных значений постоянных $q_w = 1000$, Вт/м^{2}К, $L = 1$, м, $H = 0{,}2$, м, $\lambda_f = 0{,}569$ Вт/мК (теплопроводность воды), $Pr \approx 4$ (среднее значение числа Прандтля), $\Pi = 0{,}3$. Целью приведенных выше графических зависимостей было показать, как вид функциональной связи $d_{eq} = f(\Pi) d_P$ оказывает влияние на перепад температуры ΔT_f вдоль пористого слоя протяженностью L и что решение задачи определения функции $f(\Pi)$ для произвольной морфологии, с учетом предположения о справедливости $d_{eq} = f(\Pi) d_P$, дает возможность управления перепадом температур ΔT_f при формировании пористого слоя.

Однако следует также добавить, что в зависимости от величины пористости Π вид $f(\Pi)$ также может меняться даже для слоя, сформированного из одинаковых частиц.

Заключение

Моделирование теплогидравлических процессов в пористом слое методами вычислительной гидродинамики (CFD) представляет собой сложную и ресурсоёмкую задачу. Оно эффективно лишь для сравнительно узкого диапазона параметров пористого слоя. Кроме того, при высокой вычислительной стоимости становится затруднительной качественная интерпретация протекающих процессов, поскольку каждое изменение параметров требует дополнительного пересчёта. В связи с этим развитие аналитических подходов и оценочных моделей не теряет актуальности. Их совместное использование с CFD позволяет получить наиболее физически обоснованную картину протекающих теплогидравлических процессов. Особую значимость имеют аналитические модели, учитывающие

морфологические особенности пористого слоя в широком диапазоне их варьирования.

В данной работе связь с морфологией пористого слоя была реализована через вязкостный и инерционный коэффициенты A и B и эквивалентный диаметр порового канала d_{eq}. Для определения искомых теплогидравлических характеристик потребовалось связать выражение для обобщенного коэффициента гидравлического сопротивления ξ_{eq} с числом Стэнтона St, а после получить выражение для числа Нуссельта Nu_{eq}. Указанный переход был осуществлен посредством принятия допущения о равенстве $St_k = St_*$. Следует также отметить, что данное допущение открывает возможность использования приведенных рассуждений на степенные жидкости и среды с иными реологическими соотношениями.

Литература

1. Поляев В.М., Майоров В.А., Васильев Л.Л. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов. М., изд. «Машиностроение», 1988, 168 с.: ил.
2. Анциферов В.Н., Храмцов В.Д. Высокопористые проницаемые ячеистые металлы и сплавы. Области применения // Перспективные материалы. 2002. № 2. С. 29-32.
3. Попов И.А. Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных аппаратах. Интенсификация теплообмена: монография / под общ. ред. Ю.Ф. Гортышева. Казань, изд. «Центр инновационных технологий», 2007, 240 с.
4. Черемской П.Г., Слезов В.В., Бетехтин В.И. Поры в твердом теле. М., изд. «Энергоатомиздат», 1990, 376 с.
5. Dae-Young Lee, Vafai K. Analytical Characterization and conceptual assessment of Solid and fluid temperature differentials in porous media // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1999. Vol. 42. P. 423-435.
6. Кокорев Л.С., Субботин В.И., Федосеев В.Н., Харитонов В.В., Воскобойников В.В. О взаимосвязи гидравлического сопротивления и теплоотдачи в пористых средах ТВТ. 1987. № 1. Т. 25. С. 92-97.
7. Харитонов В.В., Киселева Ю.Н., Атаманов В.В., Зейгарник Ю.А., Иванов Ф.П. Обобщение результатов интенсификации теплообмена в каналах с пористыми вставками ТВТ. 1994. № 3. Т. 32. С. 433-440.
8. Полежаев Ю.В., Протасов М.В., Селиверстов Е.М. Обобщенный закон гидравлического сопротивления проницаемого слоя ТВТ. 2003. № 6. Т. 41. С. 970-972.
9. Добрего К.В., Козначеев И.А., Шмелев Е.С. Характеристики пористого слоя, используемые при моделировании фильтрационного горения // Инженерно-физический журнал. 2008. № 3. Вып. 81. С. 456.
10. Полежаев Ю.В. Достижения и тенденции в современной теплофизике ТВТ. 1999. № 4. Т. 37. С. 663.

References

1. Polyaev V.M., Majorov V.A., Vasil'ev L.L. Gidrodinamika i teploobmen v poristyh elementah konstrukcij letatel'nyh apparatov [Hydrodynamics and heat transfer in porous elements of aircraft structures]. M., izd. «Mashinostroenie», 1988, 168 s.: il.
2. Anciferov V.N., Hramcov V.D. Vysokoporistye pronicaemye yacheistye metally i splavy. Oblasti primeneniya [High-porous permeable cellular metals and alloys. Applications] // Perspektivnye materialy. 2002. № 2. S. 29-32.
3. Popov I.A. Gidrodinamika i teploobmen v poristyh teploobmennyh apparatah. Intensifikaciya teploobmena: monografiya [Hydrodynamics and heat transfer in porous heat exchangers. Heat transfer intensification] / pod obshch. red. Yu.F. Gortysheva. Kazan', izd. «Centr innovacionnyh tekhnologij», 2007, 240 s.
4. Cheremskoj P.G., Slezov V.V., Betehtin V.I. Pory v tverdom tele [Pores in solids]. M., izd. «Energoatomizdat», 1990, 376 s.
5. Dae-Young Lee, Vafai K. Analytical Characterization and conceptual assessment of Solid and fluid temperature differentials in porous media // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1999. Vol. 42. P. 423-435.
6. Kokorev L.S., Subbotin V.I., Fedoseev V.N., Haritonov V.V., Voskobojnikov V.V. O vzaimosvyazi gidravlicheskogo soprotivleniya i teplootdachi v poristyh sredah [On the relationship between hydraulic resistance and heat transfer in porous media] // TVT. 1987. № 1. T. 25. S. 92-97.
7. Haritonov V.V., Kiseleva Yu.N., Atamanov V.V., Zejgarnik Yu.A., Ivanov F.P. Obobshchenie rezul'tatov intensifikacii teploobmena v kanalah s poristymi vstavkami [Generalization of results of heat transfer intensification in channels with porous inserts] // TVT. 1994. № 3. T. 32. S. 433-440.
8. Polezhaev Yu.V., Protasov M.V., Seliverstov E.M. Obobshchennyj zakon gidravlicheskogo soprotivleniya pronicaemogo sloya [Generalized law of hydraulic resistance of a permeable layer] // TVT. 2003. № 6. T. 41. S. 970-972.
9. Dobrego K.V., Koznacheev I.A., Shmelev E.S. Harakteristiki poristogo sloya ispol'zuemye pri modelirovanii fil'tracionnogo goreniya [Characteristics of a porous layer used in modeling filtration combustion] // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. 2008. № 3. Vyp. 81. S. 456.
10. Polezhaev Yu.V. Dostizheniya i tendencii v sovremennoj teplofizike [Achievements and trends in modern thermal physics] // TVT. 1999. № 4. T. 37. S. 663.

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

Сергеев Максимильян Сергеев, Ведущий инженер ООО «КСК СП», 19704, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Посадский, наб. Петроградская, д. 34, литера А, e-mail: sergeevms1988@mail.ru

Алексин Евгений Николаевич, заведующий кафедрой 2 (Кафедра перспективных источников энергии и систем энергообеспечения) Осн, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: aleksin@smtu.ru

Малинова Екатерина Антоновна, лаборант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: smtuekaterina@mail.ru

Maximilian S. Sergeev, Leading Engineer of KSK SP LLC, 197046, St. Petersburg, Vn. ter. g. Posadsky Municipal District, Nab. Petrogradskaya, 34, litera A, e-mail: sergeevms1988@mail.ru

Evgeniy N. Aleksin, Head of Department 2 (Department of Advanced Energy Sources and Power Supply Systems), St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: aleksin@smtu.ru

Ekaterina A. Malinova, laboratory assistant, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: smtuekaterina@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.03.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.05.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 10.06.2026.

Обзорная статья
УДК 621.82
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.039

Обзор проблематики повышения эффективности методик балансировки

Андрюхина П.А.[1] andriukhina.pa@dvfu.ru, **Портнова О.С.**[1] portnova.os@dvfu.ru,
Чумаков М.С.[1] chumakov_ms@dvfu.ru
[1]Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

Аннотация. В работе проведён обзор исследований, направленных на повышение эффективности методик балансировки роторов. В ходе анализа выявлены ключевые проблемы, возникающие при выполнении балансировочных работ. К основным проблемам относятся высокая трудоемкость традиционных подходов, значительное число пробных пусков, зависимость результатов от изменяющихся условий эксплуатации (температура, нагрузка, состояние подшипников и др.). В работе предложен усовершенствованный подход к классическому методу балансировки по динамическим коэффициентам влияния (ДКВ). Исследование выполнено в рамках задачи, направленной на разработку усовершенствованной методики, способной повысить эффективность балансировки турбоагрегатов за счёт применения ДКВ. Перспективным направлением является использование цифровых технологий. Цифровизация способствует созданию точного цифрового двойника ротора, моделированию динамического поведения системы, проведению виртуального расчёта и прогнозирования ДКВ. Предложенный подход позволяет моделировать балансировочный процесс и минимизировать затраты на натурные испытания.
Ключевые слова: вибрация, виброналадка, балансировка, ротор, динамический коэффициент влияния (ДКВ), методы балансировки, цифровая балансировка.
Для цитирования: Андрюхина П.А., Портнова О.С., Чумаков М.С. Обзор проблематики повышения эффективности методик балансировки, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 131—135. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.039

Review article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.039

Overview of improving the effectiveness of balancing techniques

Polina A. Andriukhina[1] andriukhina.pa@dvfu.ru, **Olesya S. Portnova**[1] portnova.os@dvfu.ru,
Maxim S. Chumakov[1] chumakov_ms@dvfu.ru
[1]Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. A review of studies aimed at improving the efficiency of rotor balancing techniques was carried out. During the analysis, key problems that arise during balancing work were identified. The main problems include the high labor intensity of traditional approaches, a significant number of test starts, the dependence of the results on changing operating conditions (temperature, load, bearing condition, etc.). The paper proposes an improved approach to the classical method of balancing by dynamic coefficients of influence (DCV). The study was carried out as part of the task aimed at developing an improved technique that can increase the efficiency of balancing turbine units through the use of DCV. The use of digital technologies is a promising area. Digitalization contributes to the creation of an accurate digital twin of the rotor, modeling of the dynamic behavior of the system, virtual calculation and prediction of DCV. The proposed approach makes it possible to simulate the balancing process and minimize the costs of field tests.
Key words: vibration, vibration load, balancing, rotor, dynamic coefficient of influence (DCV), balancing methods, digital balancing.
For citation: Polina A. Andriukhina, Olesya S. Portnova, Maxim S. Chumakov, Overview of improving the effectiveness of balancing techniques, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 131—135. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.039

Введение

Балансировка роторного оборудования представляет собой один из ключевых технологических процессов, который определяет надёжность, энергетическую эффективность, долговечность и общую производительность машины. Основная цель балансировки заключается в существенном снижении уровня вибрации.

Вибрация в роторных машинах, особенно в паровых и газовых турбинах, компрессорах и турбоагрегатах, может возникать из-за деформации, износа, ошибок сборки, изменения жёсткости опор и т. д. Однако большинство случаев повышенной вибрации связано с дисбалансом ротора.

Учитывая конструктивную сложность турбин, габариты, а также особенности их работы в широком диапазоне частот вращения, наиболее адекватным и практически оправданным методом приведения ротора в сбалансированное состояние является динамическая балансировка в собственных опорах на месте эксплуатации.

Данный подход позволяет учитывать реальные условия работы ротора: жёсткость и демпфирование подшипников, влияние присоединённых элементов, аэродинамические и тепловые нагрузки, а также возможные изменения динамических характеристик системы «ротор–опоры–фундамент».

© Андрюхина П.А., Портнова О.С., Чумаков М.С. 2026

Проведение балансировки по классическим методикам требует значительных затрат: большого количества пробных пусков и остановок агрегата, длительного времени простоя оборудования, существенного расхода топлива или электроэнергии, а таже привлечения квалифицированного персонала и специализированного вибродиагностического оборудования на длительный период.

В настоящее время активно развиваются исследования, направленные на повышение эффективности методов балансировки роторных машин.

1. Научные центры и проблематика

Проведенный обзор источников позволил определить научные центры, которые занимаются вопросами балансировки роторов.

Исследования, направленные на повышение эффективности методик балансировки, проведены в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Автор работы [5] предлагает усовершенствованную многоплоскостную балансировку турбоагрегатов на разгонно-балансировочных стендах (РБС) и в собственных опорах с помощью ДКВ. Предложенная методика заключается в обобщении ДКВ у роторов одного типоразмера, что будет способствовать сокращению пробных пусков всей установки.

В работе [7] автора из Поволжского государственного университета сервиса, представлено сравнение аналитической и статической моделей уравновешивания роторов турбокомпрессоров. Автором описана технология низкочастотной балансировки, основанная на измерении дисбалансов при поэтапной сборке узлов. Предлагая статический поиск корректирующих масс, построенный на методе Монте – Карло в программе MathWorks MatLab, автор подтверждает расчетами равномерное распределение вибрации. В сравнении с результатами аналитического моделирования статистический расчет показывает лучшие значения вибрации.

Исследователь из Донского государственного технического университета в работе [11] предлагает систематизировать подход балансировки, разделяя роторы по «гибкости» оси и в зависимости их неуравновешенности от скорости вращения. С целью снижения трудозатрат проведения балансировочных работ автором предложена методика моделирования механики ротора, оптимизирующая балансировку ротационных агрегатов.

В статье [10] автор описывает создание комплекса определения дисбалансов на основе матрицы векторных коэффициентов влияния. Предложенный метод, сформированный на базе компьютерных технологий, позволит решить проблему ограниченности традиционных методов балансировки роторов.

Исследование [9] направлено на уменьшение количества пусков при устранении остаточного дисбаланса жестких роторов на балансировочных станках. Авторами предложен метод динамической балансировки, основанный на механико-математической модели с применением матрицы векторных коэффициентов влияния.

Ученые Казанского национального исследовательского технического университета имени А. Н. Туполева в научном исследовании [6] для моделирования процесса балансировки роторов предлагают применять расчетные ДКВ, полученные с помощью математической модели вынужденных колебаний. Такое решение позволит снизить время и трудоемкость балансировочных работ.

Такую же задачу ставят перед собой авторы работы [4]. Для проведения высокоточной балансировки двухконсольных роторов предложена методика низкочастотной поэлементной динамической балансировки.

В работе [13] авторами предложен теоретико-экспериментальный метод расчета матрицы ДКВ, позволяющий определить массу корректирующего груза при балансировке валопроводов в собственных опорах.

Многие зарубежные исследователи занимаются решением вопросов балансировки. В результате обзора изучены статьи Ho Chi Minh University of Technology, Vietnam National University – Ho Chi Minh City, Industry University of Ho Chi Minh City, Вьетнам [19], School of Mechanical Engineering, Ajou University, Южная Корея [18], School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, КНР [20], Department of Mechanical Engineering, Aeronautical Engineering and Mechanics Rensselaer Polytechnic Institute, США [16].

В исследованиях авторы затрагивают решение множества проблем. К ним относится балансировка гибких роторов на плохо для этого подходящих низкочастотных станках, искажения замеряемых параметров при балансировке от влияния посторонних источников вибрации, недостаточная точность определения динамических характеристик системы, сохранение виброактивности ротора, вызванной остаточным дисбалансом и изменяющимися условиями работы, недостаточная точность измерений, недостаточная эффективность методик балансировки и увеличение энергоемкости и стоимости работ при балансировке роторного оборудования.

И все же одними из наиболее актуальных и острых проблем в области виброналадки роторного оборудования остаётся повышение эффективности традиционного метода балансировки по динамическим коэффициентам влияния. Ключевым недостатком метода ДКВ является необходимость выполнения большого количества пробных (экспериментальных) пусков агрегата.

2. Цифровые технологии

Недостатки классических методик балансировки роторов способны устранить современные подходы. В качестве наиболее перспективного выбраны цифровые технологии.

Многие научные исследования направлены на изучение роторного оборудования в цифровой среде. Используя понятие «цифровой двойник», авторы имеют в виду представление физического объекта в цифровой среде с сохранением характеристик объекта [15, 1].

Применение цифровой модели дает возможность исследовать конструкцию и динамику ротора внося изменения в различные параметры исследуемой системы [17, 14].

Вопросы наладки роторов с применением цифровых технологий поднимаются в работах [3, 2,

12, 8]. Используя цифровизацию балансировочного процесса, авторами предложена возможность прогнозирования вибрационного состояния исследуемых роторов.

Обзор исследований показал, что применение цифровизации способно внести значительный вклад в устранение недостатков традиционной балансировки, включая широко используемый метод балансировки с применением ДКВ, который остаётся одним из основных подходов при уравновешивании роторов турбоагрегатов в собственных опорах. Цифровые технологии позволят заменить физические пуски роторов на виртуальные. Это позволит устранить недостаток метода балансировки по ДКВ, связанный с большим количеством пусков.

Заключение

Проблема балансировки роторов турбоагрегатов сохраняет высокую актуальность из-за строгих требований к надёжности, экономичности и ресурсу оборудования. Анализ современных научных исследований подтверждает значительный интерес научного сообщества к этой теме.

Одной из ключевых задач в данной области является повышение эффективности метода балансировки по динамическим коэффициентам влияния (ДКВ). Основной недостаток этого метода — необходимость проведения большого количества пробных пусков агрегата, что влечёт существенные временные и энергетические затраты.

Перспективным решением выступает внедрение цифровых технологий. Они позволяют выполнять динамические расчёты и прогнозировать значения ДКВ на этапе моделирования, что существенно сокращает объём натурных испытаний и число физических пусков. Развитие таких подходов способно значительно повысить скорость, точность и экономическую эффективность балансировки турбоагрегатов.

Литература

1. Барсков В. В. Научные основы цифровых двойников многотопливных газотурбинных установок с внешним подводом теплоты : дис. ... д-ра техн. наук / Барсков Виктор Валентинович. – 2023. – 373 с. – EDN BWTOOC.
2. Болотов М. А. Алгоритм прогнозирования вибрационного состояния ротора турбины с использованием машинного обучения / М. А. Болотов, В. А. Печенин, Е. Ю. Печенина, Н. В. Рузанов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2020. – Т. 19, № 1. – С. 18–27. – DOI 10.18287/2541-7533-2020-19-1-18-27. – EDN TFZPVQ.
3. Болотов М. А. Информационная модель и архитектура программной системы для реализации цифрового двойника ротора турбины / М. А. Болотов, В. А. Печенин, Н. В. Рузанов, И. А. Грачев // Сборник трудов ИТНТ-2019, Самара, 21–24 мая 2019 года. Том 4. – Самара : Новая техника, 2019. – С. 833–842. – EDN TDAQVL.
4. Евгеньев С. С. Методика низкочастотной балансировки двухконсольных высокооборотных роторов турбомашин / С. С. Евгеньев, Р. Р. Заляев // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2007. – № 2. – С. 69–71. – EDN KEZEUV.
5. Жуков С. В. Разработка и совершенствование методов балансировки гибких роторов турбомашин : специальность 05.04.12 «Турбомашины и комбинированные турбоустановки» : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Жуков Сергей Викторович. – Екатеринбург, 2004. – 24 с.
6. Заляев Р. Р. Балансировка двухконсольного ротора с использованием математической модели вынужденных колебаний / Р. Р. Заляев, И. М. Ягафаров // Евразийский союз ученых. – 2018. – № 5-1(50). – С. 33–40. – EDN XQXJHV.
7. Корнеев Н. В. Имитационное аналитическое и статистическое моделирование балансировки гибких роторов турбокомпрессоров / Н. В. Корнеев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12, № 4. – С. 237–241. – EDN MSPSUL.
8. Морковин А. В. Использование цифровых двойников для наладки и ремонта роторных систем / А. В. Морковин, М. В. Грибиниченко, О. С. Портнова // Энергетик. – 2024. – № 9. – С. 33–35. – EDN MJGXIE.
9. Полушкин О. А. Повышение адекватности механико-математической модели динамики ротора на балансировочном станке / О. А. Полушкин, О. О. Полушкин, И. М. Фофана // Вестник Донского государственного технического университета. – 2016. – Т. 16, № 1(84). – С. 27–35. – DOI 10.12737/18141. – EDN VRRHLL.
10. Полушкин О. О. Балансировочный комплект нового поколения / О. О. Полушкин // Научное обозрение. – 2011. – № 5. – С. 275–282. – EDN OWGTPN.
11. Полушкин О. О. Теория и методы системного подхода к балансировке ротационных агрегатов машин : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.02 / Полушкин Олег Олегович. – Челябинск, 2021. – 32 с.
12. Портнова О.С. Комплексная методика диагностики и наладки судового энергетического оборудования / О.С. Портнова, М.В. Грибиниченко, М.С. Чумаков, П.А. Андрюхина // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2024. – № 4(410). – С. 132–136.
13. Сидоров И. Н. Численный теоретико-экспериментальный метод определения дисбалансов при балансировке валопроводов в собственных подшипниках / И. Н. Сидоров, В. В. Туктарова // Вестник Технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 5. – С. 164–169. – EDN TOUBFZ.
14. Терешко А. Г. Перспективы использования цифрового двойника авиационного двигателя для расчетов динамики роторов / А. Г. Терешко, М. К. Леонтьев, К. В. Шапошников, С. А. Дегтярев // Перспективы развития двигателестроения : материалы международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова, Самара, 21–23 июня 2023 года. Том 1 / Самарский национальный исследовательский университет имени

академика С.П. Королева. – Самара : Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2023. – С. 144–146. – EDN VWMAAS.
15. Щербатов И. А. Применение цифровых двойников с целью повышения надёжности работы оборудования в энергетике / И. А. Щербатов, А. Н. Долгушев, В. А. Агибалов, М. В. Белов // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2021. – № 7. – С. 41–45. – DOI 10.26160/2541-8637-2021-7-41-45. – EDN OXQYEY.
16. Darlow M.S. In situ balancing of flexible rotors using influence coefficient balancing and the unified balancing approach // American Society of Mechanical Engineers. – 1983. – Paper No. 83-GT-178.
17. Inozemtsev A.A., Shaposhnikov K.V., Degtyarev S.A., Leontiev M.K., Gladkiy I.L. Investigation on Information Assessment for Vibration Sensor Locations Installed in Aero-Engine Based on Unbalance Response Analysis // Proceedings of the 11th IFToMM International Conference on Rotordynamics. IFToMM 2023. Mechanisms and Machine Science. – Cham : Springer, 2024. – Vol. 140. – DOI 10.1007/978-3-031-40459-7_12.
18. Moon J.-D., Kim B.-S., Lee S.-H. Development of the active balancing device for high-speed spindle system using influence coefficients // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2006. – Vol. 46, № 9. – P. 978–987. – DOI 10.1016/j.ijmactool.2005.07.048.
19. Tuan Le Dinh, Thanh Bui Trung, Ngoc Anh Vu. Dynamic balancing of rigid rotors by the influence coefficient method // Journal of Fisheries Science and Technology. – 2024. – № 1. – DOI 10.53818/jfst.01.2024.260.
20. Ye R., Wang L., Hou X., Luo Z., Han Q. Balancing method without trial weights for rotor systems based on similitude scale model // Frontiers of Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 13, № 4. – P. 571–580. – DOI 10.1007/s11465-018-0478-x.

References

1. Barskov V. V. Nauchnye osnovy tsifrovykh dvoinikov mnogotoplivnykh gazoturbinnykh ustanovok s vneshnim podvodom teploty [Scientific foundations of digital twins of multi-fuel gas turbine installations with external heat supply]. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. 2023. 373 p. EDN BWTOOC.
2. Bolotov M. A., Pechenin V. A., Pechenina E. Yu., Ruzanov N. V. Algoritm prognozirovaniya vibratsionnogo sostoyaniya rotora turbiny s ispol'zovaniem mashinnogo obucheniya [Algorithm for predicting the vibrational state of a turbine rotor using machine learning]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*. 2020. Vol. 19. No. 1. Pp. 18–27. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-1-18-27. EDN TFZPVQ.
3. Bolotov M. A., Pechenin V. A., Ruzanov N. V., Grachev I. A. Informatsionnaya model' i arkhitektura programmnoy sistemy dlya realizatsii tsifrovogo dvoinika rotora turbiny [Information model and architecture of a software system for implementing a digital twin of a turbine rotor]. *Sbornik trudov ITNT-2019*. Samara, 21–24 May 2019. Vol. 4. Samara: Novaya tekhnika, 2019. Pp. 833–842. EDN TDAQVL.
4. Evgen'ev S. S., Zalyaev R. R. Metodika nizkochastotnoy balansirovki dvukhkonsol'nykh vysokoborotnykh rotorov turbomashin [Method of low-frequency balancing of double-console high-speed rotors of turbomachines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika*. 2007. No. 2. Pp. 69–71. EDN KEZEUV.
5. Zhukov S. V. Razrabotka i sovershenstvovanie metodov balansirovki gibkikh rotorov turbomashin [Development and improvement of methods for balancing flexible rotors of turbomachines]. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Specialty 05.04.12 «Turbomashiny i kombinirovannye turboustanovki». Ekaterinburg, 2004. 24 p.
6. Zalyaev R. R., Yagafarov I. M. Balansirovka dvukhkonsol'nogo rotora s ispol'zovaniem matematicheskoy modeli vynuzhdennykh kolebaniy [Balancing of a double-console rotor using a mathematical model of forced vibrations]. *Evraziyskiy soyuz uchenykh*. 2018. No. 5-1(50). Pp. 33–40. EDN XQXJHV.
7. Korneev N. V. Imitatsionnoe analiticheskoe i statisticheskoe modelirovanie balansirovki gibkikh rotorov turbokompressorov [Simulation analytical and statistical modeling of balancing flexible rotors of turbocompressors]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2010. Vol. 12. No. 4. Pp. 237–241. EDN MSPSUL.
8. Morkovin A. V., Gribinichenko M. V., Portnova O. S. Ispol'zovanie tsifrovykh dvoinikov dlya naladki i remonta rotornykh sistem [Use of digital twins for adjustment and repair of rotor systems]. *Energetik*. 2024. No. 9. Pp. 33–35. EDN MJGXIE.
9. Polushkin O. A., Polushkin O. O., Fofana I. M. Povyshenie adekvatnosti mekhano-matematicheskoy modeli dinamiki rotora na balansirovochnom stanke [Increasing the adequacy of the mechanical-mathematical model of rotor dynamics on a balancing machine]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016. Vol. 16. No. 1(84). Pp. 27–35. DOI: 10.12737/18141. EDN VRRHLL.
10. Polushkin O. O. Balansirovochnyy komplekt novogo pokoleniya [Balancing kit of a new generation]. *Nauchnoe obozrenie*. 2011. No. 5. Pp. 275–282. EDN OWGTPN.
11. Polushkin O. O. Teoriya i metody sistemnogo podkhoda k balansirovke rotatsionnykh agregatov mashin [Theory and methods of a systems approach to balancing rotational units of machines]. Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Specialty 05.02.02. Chelyabinsk, 2021. 32 p.
12. Portnova O. S., Gribinichenko M. V., Chumakov M. S., Andryukhina P. A. Kompleksnaya metodika diagnostiki i naladki sudovogo energeticheskogo oborudovaniya [Comprehensive methodology for diagnostics and adjustment of marine power equipment]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*. 2024. No. 4(410). Pp. 132–136.
13. Sidorov I. N., Tuktarova V. V. Chislennyy teoretiko-eksperimental'nyy metod opredeleniya disbalansov pri balansirovke valoprovodov v sobstvennykh podshipnikakh [Numerical theoretical-experimental method for determining imbalances during balancing of shaft lines in own bearings]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*. 2015. Vol. 18. No. 5. Pp. 164–169. EDN TOUBFZ.

14. Tereshko A. G., Leont'ev M. K., Shaposhnikov K. V., Degtyarev S. A. Perspektivy ispol'zovaniya tsifrovogo dvoinika aviatsionnogo dvigatelya dlya raschetov dinamiki rotorov [Prospects for using a digital twin of an aircraft engine for rotor dynamics calculations]. *Perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya*. Materials of the International Scientific and Technical Conference named after N. D. Kuznetsov. Samara, 21–23 June 2023. Vol. 1. Samara: Samarskiy natsional'nyy issledovatel'skiy universitet imeni akademika S. P. Koroleva, 2023. Pp. 144–146. EDN VWMAAS.
15. Shcherbatov I. A., Dolgushev A. N., Agibalov V. A., Belov M. V. Primenenie tsifrovykh dvoinikov s tsel'yu povysheniya nadezhnosti raboty oborudovaniya v energetike [Application of digital twins to improve the reliability of equipment operation in the energy sector]. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*. 2021. No. 7. Pp. 41–45. DOI: 10.26160/2541-8637-2021-7-41-45. EDN OXQYEY.
16. Darlow M. S. In situ balancing of flexible rotors using influence coefficient balancing and the unified balancing approach. *American Society of Mechanical Engineers*. 1983. Paper No. 83-GT-178.
17. Inozemtsev A. A., Shaposhnikov K. V., Degtyarev S. A., Leontiev M. K., Gladkiy I. L. Investigation on Information Assessment for Vibration Sensor Locations Installed in Aero-Engine Based on Unbalance Response Analysis. *Proceedings of the 11th IFToMM International Conference on Rotordynamics. IFToMM 2023. Mechanisms and Machine Science*. Cham: Springer, 2024. Vol. 140. DOI: 10.1007/978-3-031-40459-7_12.
18. Moon J.-D., Kim B.-S., Lee S.-H. Development of the active balancing device for high-speed spindle system using influence coefficients. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2006. Vol. 46. No. 9. Pp. 978–987. DOI: 10.1016/j.ijmactool.2005.07.048.
19. Tuan Le Dinh, Thanh Bui Trung, Ngoc Anh Vu. Dynamic balancing of rigid rotors by the influence coefficient method. *Journal of Fisheries Science and Technology*. 2024. No. 1. DOI: 10.53818/jfst.01.2024.260.
20. Ye R., Wang L., Hou X., Luo Z., Han Q. Balancing method without trial weights for rotor systems based on similitude scale model. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 13. No. 4. Pp. 571–580. DOI: 10.1007/s11465-018-0478-x.

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

Андрюхина Полина Александровна, аспирант Отделения машиностроения, морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10., e-mail: andriukhina.pa@dvfu.ru

Polina A. Andriukhina, graduate student, Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922, e-mail: andriukhina.pa@dvfu.ru

Портнова Олеся Сергеевна, кандидат технических наук, доцент Отделения машиностроения, морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10., e-mail: olesya.portnova@mail.ru

Olesya S. Portnova, Ph.D. (Eng) assistant professor Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport, 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922, Russia, e-mail: olesya.portnova@mail.ru

Чумаков Максим Сергеевич, аспирант Отделения машиностроения, морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10., e-mail: chumakov_ms@dvfu.ru

Maxim S. Chumakov, graduate student, Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922, e-mail: chumakov_ms@dvfu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 11.03.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.05.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 29.06.2026.

Научная статья
УДК 543.42 / 543.5
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.040

Определение концентрации ферромагнитных частиц износа в отработанных моторных маслах

Синявский Н.Я.[1] nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru**, Сынашенко О.В.**[1] oksana.synashenko@klgtu.ru,
Кострикова Н.А.[1] natalia.kostrikova@klgtu.ru
[1]Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Целью данной работы явилось определение содержания ферромагнитных частиц износа в отработанных судовых моторных маслах с помощью релаксометрии ЯМР в слабом магнитном поле. Время спин-спиновой релаксации в неоднородном поле (T_2*) очень чувствительно к микроскопическим градиентам магнитного поля. Ферромагнитные частицы обладают высокой магнитной восприимчивостью, создавая вокруг себя сильные локальные градиенты. Когда молекулы моторного масла (содержащие атомы водорода - ^{1}H) диффундируют вблизи такой частицы, они находятся под воздействием быстро меняющегося локального поля. Это приводит к расфазированию спинов и резкому уменьшению измеряемого сигнала ЯМР. Чем больше концентрация и/или размер ферромагнитных частиц в образце, тем сильнее эти градиенты и короче измеряемое время T_2*. В настоящей работе на модельных образцах исследованы зависимости T_2* от содержания и размеров частиц железа. Установлено, что основное влияние на сокращение времени релаксации ЯМР T_2* в смеси влияют частицы меньшего размера, вкладом частиц большего размера можно практически пренебречь. Предложены математические модели для скорости релаксации R_2*, с высоким коэффициентом детерминации, описывающие зависимости от концентрации ферромагнитных частиц в судовых моторных маслах. Определены концентрации ферромагнитных частиц в моторных маслах Shell Rimula 15w40 и Mobil 5W40, отработанных 250 и 160 часов, соответственно. Показано, что T_2* может служить интегральным показателем "магнитной загрязненности" масла. Метод ценен для оценки загрязнения магнитными частицами смазывающих жидкостей или для характеристики магнитных наночастиц и мониторинга их поведения в биологических системах.
Ключевые слова: судовые моторные масла; ферромагнитные частицы износа; ЯМР релаксометрия; времена релаксации T_2*, диагностика
Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания Федерального агентства по рыболовству, проект № 06-1/2025
Для цитирования: Синявский Р.Я., Сынашенко О.В., Кострикова Н.А. Определение концентрации ферромагнитных частиц износа в отработанных моторных маслах, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 136—142. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.040

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.040

Determination of the concentration of ferromagnetic wear particles in used motor oils

Nikolai Ja. Sinyavsky[1] nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru**, Oksana V. Synashenko**[1] oksana.synashenko@klgtu.ru,
Natalia A. Kostrikova[1] natalia.kostrikova@klgtu.ru
[1]Kaliningrad State Technical University, Russian Federation

Abstract. The aim of this study was to determine the content of ferromagnetic wear particles in used marine motor oils using NMR relaxometry in a weak magnetic field. The spin-spin relaxation time in a non-uniform field (T_2*) is very sensitive to microscopic magnetic field gradients. Ferromagnetic particles have high magnetic susceptibility, creating strong local gradients around themselves. When motor oil molecules (containing hydrogen atoms - ^{1}H) diffuse near such a particle, they are exposed to a rapidly changing local field. This leads to spin dephasing and a sharp decrease in the measured NMR signal. The higher the concentration and/or size of ferromagnetic particles in the sample, the stronger these gradients and the shorter the measured T_2* time. In this study, the dependences of T_2* on the iron particle content and size were investigated using model samples. It was established that the reduction in the NMR relaxation time T_2* in a mixture is primarily influenced by smaller particles, while the contribution of larger particles is practically negligible. Mathematical models for the relaxation rate R_2* are proposed, with a high determination coefficient describing the dependence on the concentration of ferromagnetic particles in marine motor oils. The concentrations of ferromagnetic particles in Shell Rimula 15w40 and Mobil 5W40 motor oils after 250 and 160 hours of operation, respectively, were determined. It is shown that T_2* can serve as an integral indicator of the "magnetic contamination" of the oil. The method is valuable for assessing the contamination of lubricating fluids with magnetic particles or for characterizing magnetic nanoparticles and monitoring their behavior in biological systems.
Keywords: marine motor oils; ferromagnetic wear particles; NMR relaxometry; T_2* relaxation times, diagnostics
Financial Support: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Fisheries Agency, project No. 06-1/2025

© Синявский Р.Я., Сынашенко О.В., Кострикова Н.А. 2026

For citation: Nikolai Ja. Sinyavsky, Oksana V. Synashenko, Natalia A. Kostrikova, Determination of the concentration of ferromagnetic wear particles in used motor oils. Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 136—142. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.040

Введение

Отработанное моторное масло содержит частицы износа деталей, количественное содержание которых дает информацию для диагностики состояния двигателя. Для исследования ферромагнитных частиц в жидкостях существуют анализаторы на основе магнитометров высокой чувствительности [1-4], которые позволяют оценивать их концентрацию, размеры и форму. Это оборудование является достаточно сложным, дорогостоящим и требует предварительной подготовки образцов.

Релаксация T_2^* является одним из основных факторов, определяющих контрастность изображения и лежит в основе многих применений магнито-резонансной томографии (МРТ) [5, 6]. Последовательности градиентного эха с контрастом на основе T_2^* используются для визуализации кровоизлияний, кальцификации и отложений железа в различных тканях и поражениях. Контраст на основе T_2^* используется для различий в магнитной восприимчивости крови, а также железа и кальцификации в различных тканях. В [6] представлены основы релаксации T_2^* и их клиническое применение для функциональной МРТ и визуализацию перегрузки железом.

В статьях [7, 8] представлен краткий обзор некоторых наиболее значимых примеров применения магнитных наночастиц в наномедицине, главным образом в МРТ. Проводится критический обзор корреляций между их эффективностью в качестве контрастных агентов в МРТ и магнитным ядром магнитных наночастиц (в основном оксидами железа), их размером и формой, а также покрытием и растворителем, используемыми для обеспечения их биосовместимости и хорошей диспергируемости в физиологических средах.

В [9] охарактеризовали серию монодисперсных магнитных наночастиц оксида железа, используя различные методы, и измерили их скорости релаксации с помощью низкопольного прибора ядерного магнитного резонанса с напряженностью поля 0,47 Тл. Показано, что свойства магнитных наночастиц тесно связаны с их размерами; однако ни скорость продольной релаксации, ни скорость поперечной релаксации не изменяются монотонно с размером частиц.

В работе [10] для количественной оценки концентрации нанопорошка магнетита в воде было предложено использовать эффект уменьшения времени поперечной релаксации T_2 сигнала ЯМР протонов воды в присутствии магнитных частиц. Была получена калибровочная зависимость релаксационной способности от концентрации железа для модельных суспензий наночастиц магнетита размером приблизительно 20 нм в диапазоне концентраций 0,15–70 мг/л.

В [11] обсуждаются разные модели ЯМР релаксации при наличии суперпарамагнитных наночастиц, которые используются в качестве контрастных агентов. Каждая модель может использоваться только в определенных условиях или для определенной последовательности (CPMG, спиновое эхо, свободное индукционное затухание и т. д.). Параметры, включенные в уравнения, должны интерпретироваться с осторожностью. Понимание релаксации, индуцированной наночастицами, все еще остается неясным, поскольку их распределение в тканях неоднородно, из-за кластеризации.

В [12] сообщается о зависимости фазовой релаксационной способности $1/T_2$ от формы частиц. Показано, что зависимость релаксационной способности от размера для сферических частиц может быть обобщена на сфероидальные частицы. Установлено, что сферические частицы имеют большую релаксационную способность (в отсутствие насыщения), чем сфероидальные частицы.

В публикации [13] компьютерное моделирование позволило провести анализ укорочения T_2, вызванного магнитной восприимчивостью, сильно намагниченными частицами. Для очень малых сильно намагниченных частиц предсказания теорий медленной диффузии не согласуются с результатами моделирования.

В работе [14] представлены результаты исследования процесса износа моющих присадок и естественного старения моторного масла М-6з/12Г1 после обработки торцевым трением и возникновения частиц износа на начальном этапе работы двигателя. Установлено, что время релаксации протонов исследуемого моторного масла уменьшается с ростом в его коллоидном растворе количества ферромагнитных частиц — продуктов износа. Полученные результаты могут быть использованы для трибодиагностики начальной стадии износа моющих присадок в моторном масле.

В работе [15] описывается новый метод определения фракционного состава системы ферромагнитных частиц износа в отработанном моторном масле, основанный на кинетике седиментации частиц в поле силы тяжести и аппаратурном времени поперечной релаксации ЯМР протонов углеводородов полидисперсной суспензии. В отличие от традиционного седиментационного анализа методом непрерывного взвешивания, в предлагаемом способе используется метод непрерывного измерения времени ЯМР релаксации T_2^*. Методика может быть использована для анализа грубодисперсных (10^{-6}-10^{-4} м) ферромагнитных частиц в суспензиях любых других органических жидкостей.

Целью данной работы явилось определение содержания ферромагнитных частиц износа в отработанных судовых моторных маслах с помощью релаксометрии ЯМР в слабом магнитном поле.

Методика экспериментальных исследований

Метод реализуется на низкополевом спектрометре ЯМР, предназначенном для релаксометрии. Образец подвергается воздействию короткого радиочастотного импульса для возбуждения ядер ^1H. Регистрируется сигнал свободной индукции (FID). Сигнал FID затухает со временем T_2^* (из-за неоднородностей поля, в том числе созданных частицами). По скорости затухания

FID определяется эффективное время T_2^*. Короткое T_2^* указывает на высокую концентрацию ферромагнитных загрязнений.

Для измерений использовался ЯМР релаксометр PQ001 Niumag Corporation Petroleum с магнитом 0.5 Т (частота для протонов 21 МГц), диаметр пробирки для образца 25 мм, высота образца в пробирке 20 мм. Использовалось программное обеспечение релаксометра NMRAS (NMR Analyzing System Ver4.0) и программа Q-FID. Инверсия спада свободной индукции выполнялась с помощью алгоритма SIRT (Simultaneous Iterative Reconstructive Technique). Все эксперименты выполнялись при температуре 32 ºС (температура стабилизации магнитного поля).

Для исследований использовались свежие и отработанные моторные масла Shell Rimula 15w40 и Mobil 5W40. В качестве модели отработанного масла частицы железа, полученные с помощью наждачной бумаги зернистостью от P100 до P800 добавляли в свежие моторные масла. Абразивный материал наждачной бумаги, частично попадавший вместе с частицами железа в модельный образец моторного масла, ферромагнитными свойствами не обладает и не влияет на результат эксперимента. Приготовленные таким образом образцы и отработанные моторные масла помещали в измерительные пробирки и хорошо перемешивали для получения однородных взвесей частиц.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ

На рис.1 показаны полученные зависимости скорости релаксации R_2^* от процентного содержания железа в масле Shell Rimula 15w40 для частиц разных средних диаметров *d*.

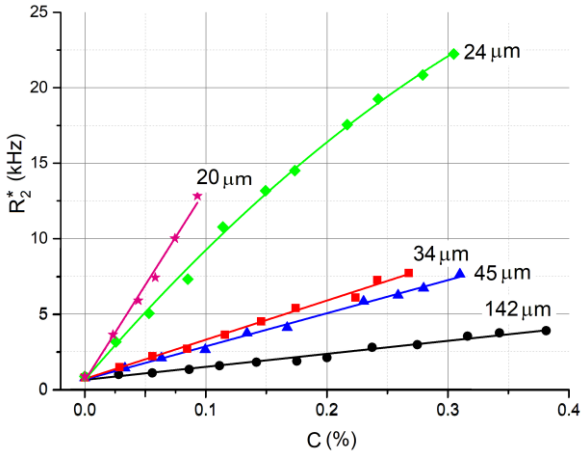


Рис. 1. Зависимости скорости релаксации $R_2^*=1/T_2^*$ ЯМР протонов в свежем моторном масле Shell Rimula 15w40 от массовой концентрации частиц железа разного размера d.

Распределения времен релаксации T_2^* для частиц железа размерами *d* =24 μm и 55 μm в концентрациях 0.05 % и их смеси в масле Shell Rimula 15w40 иллюстрирует рис. 2.

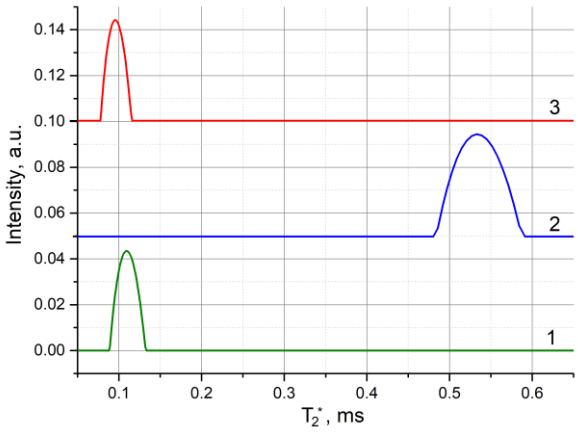


Рис. 2. Распределения времен релаксации T_2^* для частиц железа размерами d =24μm (1) и 55 μm (2) в концентрациях 0.05 % и их смеси (3) в масле Shell Rimula 15w40.

Из рис. 2 видно, что основное влияние на сокращение времени релаксации в смеси влияют частицы меньшего размера, вкладом частиц большего размера можно практически пренебречь.

Предполагая для простоты, что все частицы имеют форму сферы радиуса *r*, концентрацию частиц можно найти по формуле:

$$n = \frac{C}{100} \cdot \frac{\mu_{oil}}{\mu_{Fe}} \cdot \frac{3}{4\pi r^3} \quad (1)$$

где *C* – процентное массовое содержание железа в масле, μ_{oil} и μ_{Fe} – плотности масла и железа, соответственно, *r* – радиус частицы.

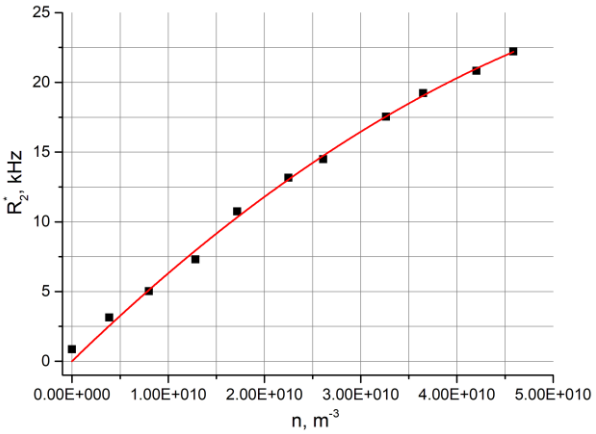


Рис. 3. Зависимость скорости релаксации R_2^* от концентрации частиц железа в масле Shell Rimula 15w40.

Экспериментальная зависимость величины $R_2^*=1/T_2^*$ от концентрации частиц железа в моторном масле Shell Rimula 15w40 (рис. 3) аппроксимирована квадратичным полиномом:

$$R_2^* = 6.713 \cdot 10^{-10} n - 4.093 \cdot 10^{-21} n^2 \quad (2)$$

с коэффициентом детерминации $R^2=0.9963$. Измеренное аппаратурное время спин-спиновой релаксации ЯМР протонов в отработанном 250 часов моторном масле Shell Rimula 15w40 равно $T_2^*=1.102$ мс (или $R_2^*=0.907$ кГц). Используя формулу (2) находим, что концентрация ферромагнитных частиц в отработанном масле равна $n_{used}=1.38 \cdot 10^8$ м$^{-3}$.

Зависимости времени релаксации T_2^* ЯМР протонов в свежем моторном масле Mobil 5W40 от массовой концентрации частиц железа разного размера приведены на рис. 4.

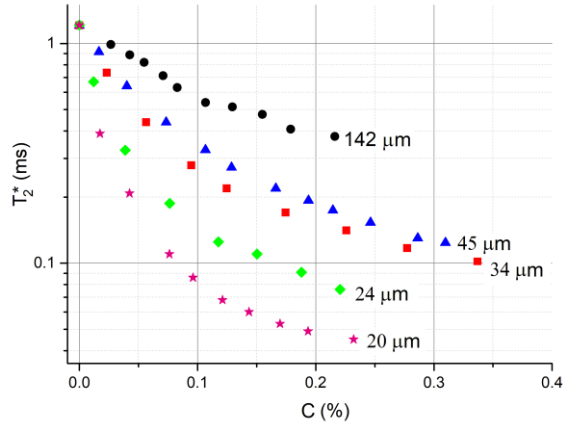


Рис. 4. Зависимости времени релаксации T_2^* ЯМР протонов в свежем моторном масле Mobil 5W40 от массовой концентрации частиц железа разного размера.

На рис. 5. Показана зависимость скорости релаксации R_2^* от концентрации частиц железа в масле Mobil 5W40.

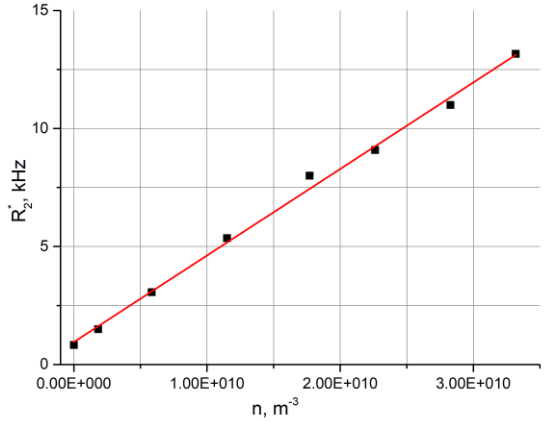


Рис. 5. Зависимость скорости релаксации R_2^* от концентрации частиц железа в масле Mobil 5W40.

Зависимость на рис. 5 аппроксимируется прямой:

$$R_2^* = 0.8251 + 3.7185 \cdot 10^{-10} n \quad (3)$$

с критерием Пирсона 0.99669. Измеренное аппаратурное время спин-спиновой релаксации ЯМР протонов в отработанном 160 часов моторном масле Mobil 5W40 равно T_2^*=1.156 мс (или R_2^*=0.865 кГц). Используя формулу (3) находим, что концентрация ферромагнитных частиц в отработанном масле равна $n_{used}=1.08\cdot10^8$ м$^{-3}$.

Наиболее употребительная модель для описания релаксации в присутствии магнитных частиц — это модель внешнесферной релаксации (Outer Sphere relaxation theory), развитая в целом ряде работ. Для T_2^*-релаксации, доминирующей является статическая дефазировка (в приближении быстрой диффузии). Скорость релаксации выражается как:

$$\frac{1}{T_2^*} = \frac{1}{T_{20}} + \left(\frac{1}{T_2^*}\right)_{mag} \quad (4)$$

где $1/T_{20}$ — скорость релаксации чистой жидкости (без частиц), $(1/T_2^*)_{mag}$ — добавочная скорость релаксации, обусловленная магнитными частицами.

Ключевая формула [16] для магнитного вклада в приближении статической дефазировки:

$$\left(\frac{1}{T_2^*}\right)_{mag} \approx \left(\frac{1}{T_2}\right)_{mag} \approx \frac{16\pi^2}{405}\gamma^2\mu_0^2 M_s^2 \left(\frac{V_p}{kT}\right) f_p \quad (5)$$

где γ — гиромагнитное отношение протона, μ_0 — магнитная постоянная, M_s — намагниченность насыщения частицы, V_p — объем одной магнитной частицы (V_p = (4/3)πr³ для сферы радиусом *r*), k — постоянная Больцмана,T — абсолютная температура, f_p — объемная доля (концентрация) магнитного материала (безразмерная величина: $f_p = N_p V_p$, где N_p — число частиц в единице объема).

На практике T_2^* всегда меньше T_2 из-за дополнительных неоднородностей поля спектрометра. Зависимость T_2^* от концентрации ферромагнитных частиц следует напрямую из формулы выше: $1/T_2^* \propto f_p$, то есть скорость релаксации $(1/T_2^*)$ прямо пропорциональна объемной концентрации (f_p) магнитного материала. Эта линейная зависимость на практике позволяет калибровать T_2^* для количественного определения концентрации ферромагнитных частиц.

Зависимость скорости релаксации от размера ферромагнитных частиц иллюстрирует рис. 1 и рис. 4. Мелкие частицы значительно сильнее укорачивают T_2^*, чем крупные, при той же массовой концентрации магнитного материала.

Форма частиц влияет на распределение магнитного поля вокруг частицы. Сфера создает наиболее симметричное поле. Приведенная формула выведена для сферических частиц. Вытянутые частицы обладают магнитной анизотропией формы и часто более высокой эффективной намагниченностью вдоль длинной оси. Магнитное поле вокруг них более неоднородное и дальнодействующее. Это делает их более эффективными релаксаторами на единицу объема, чем сферы.

Использование методов обратного преобразования Лапласа (ОПЛ) для получения распределения времен релаксации, позволяющего выявить значение T_2^*(или сдвиг в сторону более коротких времен в распределении) напрямую коррелирует с увеличением концентрации ферромагнитных частиц износа, что указывает на износ двигателя.

Этот эффект измерим и отличается от эффектов деградации масла, что делает его мощным инструментом для ранней трибодиагностики.

Формула (5) для магнитного вклада в поперечную релаксацию в приближении статической дефазировки действительно является классической для описания ЯМР в жидкостях с ферромагнитными частицами. Формула получена в приближении статической дефазировки (Static Dephasing Regime): Это ключевое допущение, при котором формула справедлива. Оно предполагает, что молекулы жидкости (протоны) не успевают существенно переместиться (диффундировать) за время измерения. Она широко цитируется в

литературе по магнитным наночастицам, контрастным агентам для МРТ и ЯМР-релаксометрии дисперсных систем. Для ферромагнитной наночастицы эффективная восприимчивость огромна ($\chi_{eff} \sim \mu_0 M_s^2 V_p/(kT)$), что и отражено в данной формуле. Формула годится для разбавленной суспензии монодисперсных сферических ферромагнитных частиц.

Преимущества метода, основанного на ЯМР времени релаксации T_2*:

- высокая чувствительность, метод способен обнаруживать очень малые концентрации частиц (единицы-десятки ppm по массе) и наноразмерные частицы;
- быстрота анализа, измерение занимает от нескольких секунд до минуты;
- простота подготовки образца, не требуется разбавление, фильтрация или сложная обработка. Можно анализировать масло прямо из картера двигателя;
- неразрушающий метод;
- интегральная информация, метод дает суммарный эффект от всех магнитных частиц, что хорошо коррелирует с общим износом ферромагнитных деталей.

Ограничения метода ЯМР релаксометрии T_2*:

- Селективность к материалу. Метод в первую очередь чувствителен к ферромагнитным частицам (железо, сталь). Он слабо реагирует на диамагнитные (алюминий, медь, олово) и парамагнитные в слабых полях (частицы некоторых оксидов) частицы. Для их обнаружения может использоваться измерение времени спин-решеточной релаксации T_1, которое также изменяется в присутствии парамагнетиков.
- Влияние вязкости: Вязкость масла сама по себе влияет на время релаксации T_2 (более вязкое масло имеет большее T_2). Однако вклад от частиц обычно на порядки сильнее, особенно в отработанных маслах, и эту помеху можно скорректировать калибровкой или одновременным измерением T_2 при специальной многоимпульсной последовательности (например, CPMG), которая исключает влияние постоянных неоднородностей поля.
- Не дает информации о размере и распределении частиц, является интегральным методом. Для получения гранулометрического состава требуются более сложные измерения (например, анализ зависимости скорости релаксации от времени диффузии) или дополнительные методы (лазерная спектрометрия, анализ феррограмм).

Заключение

Таким образом, в настоящей работе на модельных образцах исследованы зависимости T_2* от содержания и размеров частиц железа. Определены концентрации ферромагнитных частиц в отработанных моторных маслах Shell Rimula 15w40 и Mobil 5W40. Показано, что T_2* может служить интегральным показателем "магнитной загрязненности" масла. Способ определения концентрации ферромагнитных частиц износа в моторном масле на основе измерения времени релаксации T_2* ЯМР является одним из самых перспективных, быстрых и чувствительных методов для этой задачи. Он может успешно применяться в научных исследованиях и в перспективе начнет внедряться в промышленные системы мониторинга состояния двигателей. Для комплексного анализа износа его следует комбинировать с другими методами (спектральным анализом на атомном эмиссионном спектрометре, феррографией), чтобы получить информацию и о немагнитных металлах.

Релаксометрия ЯМР T_2* позволяет количественно определять концентрацию ферромагнитных частиц в суспензиях измеряя, как их магнитные поля сокращают время релаксации T_2* протонов моторного масла. По зависимости скорости релаксации ($1/T_2$*) от известных концентраций ферромагнитных частиц можно построить калибровочную кривую, позволяющую определять неизвестные концентрации по измеренным значениям T_2*. Этот метод ценен для характеристики магнитных наночастиц и оценки загрязнения магнитными частицами смазывающих жидкостей.

Литература

1. Fitch J. Tricks to Classifying Wear Metals and Other Used Oil Suspensions / Noria Corporation. https://www.machinerylubrica-tion.com/Read/3/wear-metals-oil-suspensions
2. Wear Debris Analysis & Debris Monitoring Equipment. Sietronics Pty Ltd. https://www.sietronics.net/analex-wear-debris
3. Govindarajan N. and Gnanamoorthy R. Ferrography – A Procedure for Measuring Wear Rate / Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. 2008. Vol. 15. N. 5, P. 377-381.
4. Seifert W.W. and Westcott V.C. A Method for the Study of Wear Particles in Lubricating Oil / Wear. 1972. Vol. 21. N. 1. P. 27-42. https://doi.org/10.1016/0043-1648(72)90247-5
5. Rodney A. Brooks, Francis Moiny, and Pierre Gillis. On T_2-Shortening by Weakly Magnetized Particles: The Chemical Exchange Model / Magnetic Resonance in Medicine. 2001. Vol. 45. P. 1014–1020. https://doi.org/10.1002/mrm.1135
6. Chavhan G.B., Babyn P.S., Thomas B., Shroff M.M., Haacke E.M. Principles, techniques, and applications of T_2*-based MR imaging and its special applications / Radiographics. 2009. Vol. 29. N. 5. P. 1433-1449. doi: 10.1148/rg.295095034.
7. Smolensky E.D., Park H.Y., Zhou Y., Rolla G.A., Marjańska M., Botta M., Pierre V.C. Scaling Laws at the Nano Size: The Effect of Particle Size and Shape on the Magnetism and Relaxivity of Iron Oxide Nanoparticle Contrast Agent / J Mater Chem B. 2013. Vol. 1. N. 22. P. 2818-2828. doi: 10.1039/C3TB00369H.
8. Paolo Arosio, Francesco Orsini, Francesca Brero, Manuel Mariani, Claudia Innocenti, Claudio Sangregorio and Alessandro Lascialfari. The effect of size, shape, coating and functionalization on nuclear relaxation properties in iron oxide core–shell nanoparticles: a brief review of the situation / Dalton Trans. 2023. Vol. 52. P. 3551-3562. DOI: 10.1039/D2DT03387A

9. Zhang Y., Cheng J., Liu W. Characterization and Relaxation Properties of a Series of Monodispersed Magnetic Nanoparticles / Sensors (Basel). 2019. Vol. 19. N. 15. P. 3396. doi: 10.3390/s19153396.
10. Медведева И.В., Жаков С.В., Ревво А.В. и др. Применение ЯМР-релаксометрии для определения концентрации нанопорошка магнетита в водной среде / Phys. Metals Metallogr. 2014. Vol. 115. P. 744–748. https://doi.org/10.1134/S0031918X14080110
11. Quoc Lam Vuong, Pierre Gillis, Alain Roch, Yves Gossuin, Magnetic resonance relaxation induced by superparamagnetic particles used as contrast agents in magnetic resonance imaging: a theoretical review / WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology. 2017. https://doi.org/10.1002/wnan.1468
12. Joseph N. York, Christopher Albanese, Olga Rodriguez, Yi-Chien Lee, Marian Ackun-Farmmer, and Edward Van Keuren. The Effects of Particle Shape and Size on T_2 Relaxation in Magnetic Resonance Imaging / Journal of Biomedical Nanotechnology. 2014. Vol. 10. P. 3392–3396. DOI: https://doi.org/10.1166/jbn.2014.1870
13. Pierre Gillis, Francis Moiny, and Rodney A. Brooks. On T2-Shortening by Strongly Magnetized Spheres: A Partial Refocusing Model / Magnetic Resonance in Medicine. 2002. Vol. 47. P. 257–263. https://doi.org/10.1002/mrm.10059
14. Skotnikova M.A., Vinogradov D.A., Ivanova G.V., Tsvetkova G.V., Galyshev Yu.V. Tribodiagnostics of the initial stage of wear of detergent additives in in motor oil / Industrial laboratory. Diagnostics of materials. 2025. Vol. 91. N. 12. P. 101-107. (In Russ.) https://doi.org/10.26896/1028-6861-2025-91-12-101-107.
15. Glushkov A.D., Sinyavskii N.Ya., and Kostrikova N.A., Dispersion Analysis of Ferromagnetic Particles in Used Motor Oils / Journal of Friction and Wear. 2025. Vol. 46. N. 3. P. 185–190. © Allerton Press, Inc. DOI:10.3103/S1068366625700503
16. Gillis, P., Koenig, S. H. Transverse relaxation of solvent protons induced by magnetized spheres: Application to ferritin, erythrocytes, and magnetite / Magnetic Resonance in Medicine. 1987. Vol. 5. N. 4. P. 323–345. DOI: 10.1002/mrm.1910050404

References

1. Fitch J. Tricks to Classifying Wear Metals and Other Used Oil Suspensions / Noria Corporation. https://www.machinerylubrica-tion.com/Read/3/wear-metals-oil-suspensions
2. Wear Debris Analysis & Debris Monitoring Equipment. Sietronics Pty Ltd. https://www.sietronics.net/analex-wear-debris
3. Govindarajan N. and Gnanamoorthy R. Ferrography – A Procedure for Measuring Wear Rate / Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. 2008. Vol. 15. N. 5, P. 377-381.
4. Seifert W.W. and Westcott V.C. A Method for the Study of Wear Particles in Lubricating Oil / Wear. 1972. Vol. 21. N. 1. P. 27-42. https://doi.org/10.1016/0043-1648(72)90247-5
5. Rodney A. Brooks, Francis Moiny, and Pierre Gillis. On T_2-Shortening by Weakly Magnetized Particles: The Chemical Exchange Model / Magnetic Resonance in Medicine. 2001. Vol. 45. P. 1014–1020. https://doi.org/10.1002/mrm.1135
6. Chavhan G.B., Babyn P.S., Thomas B., Shroff M.M., Haacke E.M. Principles, techniques, and applications of T_2*-based MR imaging and its special applications / Radiographics. 2009. Vol. 29. N. 5. P. 1433-1449. doi: 10.1148/rg.295095034.
7. Smolensky E.D., Park H.Y., Zhou Y., Rolla G.A., Marjańska M., Botta M., Pierre V.C. Scaling Laws at the Nano Size: The Effect of Particle Size and Shape on the Magnetism and Relaxivity of Iron Oxide Nanoparticle Contrast Agent / J Mater Chem B. 2013. Vol. 1. N. 22. P. 2818-2828. doi: 10.1039/C3TB00369H.
8. Paolo Arosio, Francesco Orsini, Francesca Brero, Manuel Mariani, Claudia Innocenti, Claudio Sangregorio and Alessandro Lascialfari. The effect of size, shape, coating and functionalization on nuclear relaxation properties in iron oxide core–shell nanoparticles: a brief review of the situation / Dalton Trans. 2023. Vol. 52. P. 3551-3562. DOI: 10.1039/D2DT03387A
9. Zhang Y., Cheng J., Liu W. Characterization and Relaxation Properties of a Series of Monodispersed Magnetic Nanoparticles / Sensors (Basel). 2019. Vol. 19. N. 15. P. 3396. doi: 10.3390/s19153396.
10. Medvedeva I.V., Zhakov S.V., Revvo A.V. et al. Application of NMR relaxometry to determine the concentration of magnetite nanopowder in an aqueous medium / Phys. Metals Metallogr. 2014. Vol. 115. P. 744–748. https://doi.org/10.1134/S0031918X14080110
11. Quoc Lam Vuong, Pierre Gillis, Alain Roch, Yves Gossuin, Magnetic resonance relaxation induced by superparamagnetic particles used as contrast agents in magnetic resonance imaging: a theoretical review / WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology. 2017. https://doi.org/10.1002/wnan.1468
12. Joseph N. York, Christopher Albanese, Olga Rodriguez, Yi-Chien Lee, Marian Ackun-Farmmer, and Edward Van Keuren. The Effects of Particle Shape and Size on T_2 Relaxation in Magnetic Resonance Imaging / Journal of Biomedical Nanotechnology. 2014. Vol. 10. P. 3392–3396. DOI: https://doi.org/10.1166/jbn.2014.1870
13. Pierre Gillis, Francis Moiny, and Rodney A. Brooks. On T2-Shortening by Strongly Magnetized Spheres: A Partial Refocusing Model / Magnetic Resonance in Medicine. 2002. Vol. 47. P. 257–263. https://doi.org/10.1002/mrm.10059
14. Skotnikova M.A., Vinogradov D.A., Ivanova G.V., Tsvetkova G.V., Galyshev Yu.V. Tribodiagnostics of the initial stage of wear of detergent additives in in motor oil / Industrial laboratory. Diagnostics of materials. 2025. Vol. 91. N. 12. P. 101-107. (In Russ.) https://doi.org/10.26896/1028-6861-2025-91-12-101-107.
15. Glushkov A.D., Sinyavskii N.Ya., and Kostrikova N.A., Dispersion Analysis of Ferromagnetic Particles in Used Motor Oils / Journal of Friction and Wear. 2025. Vol. 46. N. 3. P. 185–190. © Allerton Press, Inc. DOI:10.3103/S1068366625700503

16. Gillis, P., Koenig, S. H. Transverse relaxation of solvent protons induced by magnetized spheres: Application to ferritin, erythrocytes, and magnetite / Magnetic Resonance in Medicine. 1987. Vol. 5. N. 4. P. 323–345. DOI: 10.1002/mrm.1910050404

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

Синявский Николай Яковлевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru

Nikolai Ja. Sinyavsky, Dr. Sci. (Phys & Math), Professor, Head of the Department of physics, Kaliningrad state technical University, Sovetsky Prospekt, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru

Сынашенко Оксана Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: oksana.synashenko@klgtu.ru

Oksana V. Synashenko, Ph. D. (Phys), assistant professor, Kaliningrad state technical University, Sovetsky Prospekt, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: oksana.synashenko@klgtu.ru

Кострикова Наталья Анатольевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru

Natalia A. Kostrikova, Ph. D. (Phys), assistant professor, Kaliningrad state technical University, Sovetsky Prospekt, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: inatalia.kostrikova@klgtu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 28.05.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 25.06.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 30.060.2026.

Научная статья
УДК 621.125
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.041

Цифровая трансформация судовых азиподов: методика валидации и спектрального анализа вибрации в реальных условиях эксплуатации, включая ледовые

Герасиди В.В.[1] gerasidi@rambler.ru
[1]Государственный морской университет имени Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. Статья посвящена разработке методики валидации и спектрального анализа архивных данных вибромониторинга судовых азиподов, полученных со штатной системы ProCheck в реальных условиях эксплуатации, включая работу во льдах. Цель работы является обеспечить возможность дальнейшей диагностики азиподов на основе автоматизированной обработки данных, включающей проверку целостности файлов, устранение дубликатов, отбор полных моментов времени, фильтрацию измерений по оборотам и углу поворота, а также идентификацию доминирующих частот (оборотной и лопастной) для последующего построения статистических доверительных интервалов и выработки диагностических правил. Предложен алгоритм автоматизированной обработки, реализованный на языке Python с использованием специализированных библиотек. Валидация включает проверку целостности файлов, дубликатов, полноты момента (четыре датчика), а также соответствие диапазонам оборотов и угла. Определены доминирующие гармоники (1X и лопастная частота BFF). Построены доверительные интервалы (10–90 процентили) для долей диагностических паттернов в нормальных условиях. Представлены уникальные данные двухлетнего мониторинга судна ледового класса. Разработанная методика не зависит от закрытых алгоритмов производителя и может быть адаптирована для других систем непрерывного контроля вращающегося оборудования. Результаты имеют значение для импортозамещения и повышения технологической безопасности морской отрасли РФ. Разрабатываемая диагностическая платформа в рамках цифровой трансформации технической эксплуатации судовых энергетических установок (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. Цифровая трансформация судовых азиподов: методика валидации и спектрального анализа вибрации в реальных условиях эксплуатации, включая ледовые, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 143—153. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.041

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.041

Digital transformation of marine azipods: a methodology for validation and spectral analysis of vibration in real operating conditions, including ice conditions

Viktor V. Gerasidi[1] gerasidi@rambler.ru
[1]Admiral Ushakov State Maritime University, Russian Federation

Abstract. This article is devoted to the development of a methodology for the validation and spectral analysis of archived vibration monitoring data for ship azipods obtained from the standard ProCheck system under real-world operating conditions, including operation in ice. The aim of the study is to enable further diagnostics of azipods based on automated data processing, including file integrity checking, duplicate elimination, selection of complete time points, filtering measurements by RPM and rotation angle, and identification of dominant frequencies (rotational and blade) for the subsequent construction of statistical confidence intervals and the development of diagnostic rules. An automated processing algorithm is proposed, implemented in Python using specialized libraries. Validation includes checking file integrity, duplicates, torque completeness (four sensors), and compliance with RPM and angle ranges. Dominant harmonics (1X and blade frequency BFF) are determined. Confidence intervals (10–90 percentiles) are constructed for the proportions of diagnostic patterns under normal conditions. Unique data from two years of monitoring an ice-class vessel is presented. The developed methodology is independent of proprietary manufacturer algorithms and can be adapted to other continuous monitoring systems for rotating equipment. The results are important for import substitution and improving the technological safety of the Russian maritime industry.
The diagnostic platform being developed as part of the digital transformation of the technical operation of marine propulsion systems (MPS) 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.

© Герасиди В.В. 2026

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, Digital transformation of marine azipods: a methodology for validation and spectral analysis of vibration in real operating conditions, including ice conditions, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 143—153. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.041

Введение

Азиподы (Azipod®) представляют собой уникальные пропульсивные комплексы, совмещающие функции движителя и рулевого устройства, и широко применяются на судах различного назначения – от ледоколов и круизных лайнеров до буровых платформ и специализированных судов. За более чем 30 лет эксплуатации технология доказала свою надёжность и эффективность: общая наработка парка превысила 20 миллионов часов, а количество установленных или заказанных единиц приближается к 700. Азиподы используются на более чем 25 типах судов, в том числе на 90 ледоколах и судах ледового класса, а также более чем на 110 круизных лайнерах (рисунок 1). Модель Azipod® C, предназначенная для буровых и офшорных судов, накопила свыше 2 миллионов часов, при этом отдельные установки могут работать без докования до 9 лет [1, 2].

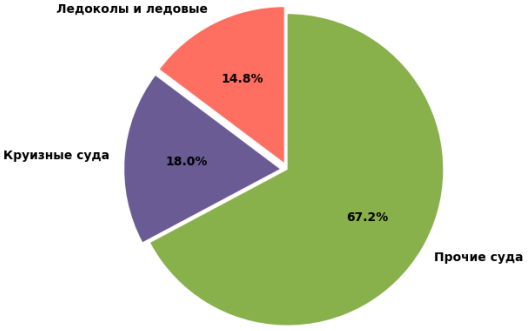
Эксплуатация в ледовых условиях создаёт экстремальные динамические нагрузки, влияющие на техническое состояние ключевых узлов – упорного и опорного подшипников, гребного винта и электродвигателя. Одними из наиболее информативных показателей, характеризующих механическую и гидродинамическую нагруженность вала, являются амплитуда лопастной частоты (Blade Pass Frequency, BFF), связанная с взаимодействием винта с потоком, и оборотная гармоника 1X на осевом датчике, отражающая осевые усилия. Рост этих параметров может свидетельствовать о дисбалансе винта, обрастании корпуса, работе во льдах или повышенной нагрузке на движитель. Своевременное выявление таких изменений критически важно для обеспечения безопасности мореплавания, предотвращения аварийных остановок и оптимизации эксплуатационных расходов.

Современные азиподы оснащаются встроенными системами вибродиагностики с датчиками, установленными непосредственно на подшипниковых опорах [3–8]. Однако, несмотря на широкое распространение таких систем, в научной литературе практически отсутствуют публикации, анализирующие реальные эксплуатационные данные, особенно в ледовых условиях. Существующие работы (например, Roivainen & Viheriälehto, 2023) сосредоточены преимущественно на проблеме подводного шума (URN), а не на диагностике технического состояния. В то же время производитель (ABB) предлагает услуги по модернизации систем мониторинга (Azipod® Condition Monitoring Retrofit), подтверждая востребованность таких решений в индустрии, однако подробные алгоритмы обработки данных и диагностические правила остаются закрытыми.

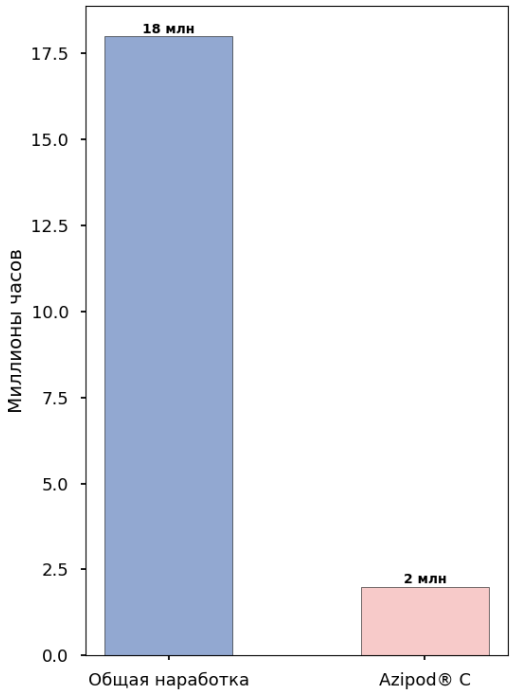
Настоящая работа впервые представляет анализ многоканальных записей вибрации, полученных непосредственно от штатных датчиков азипода ледового класса в процессе реальной эксплуатации, включая периоды работы во льдах.

Цель работы является обеспечить возможность дальнейшей диагностики азиподов на основе автоматизированной обработки данных, включающей проверку целостности файлов, устранение дубликатов, отбор полных моментов времени, фильтрацию измерений по оборотам и углу поворота, а также идентификацию доминирующих частот для последующего построения статистических доверительных интервалов и выработки диагностических правил. Разработанная методика валидации данных автоматизированного контроля вибрации позволит учесть погрешности измерений и получить чистые экспериментальные данные для последующего анализа.

а)



б)



в)

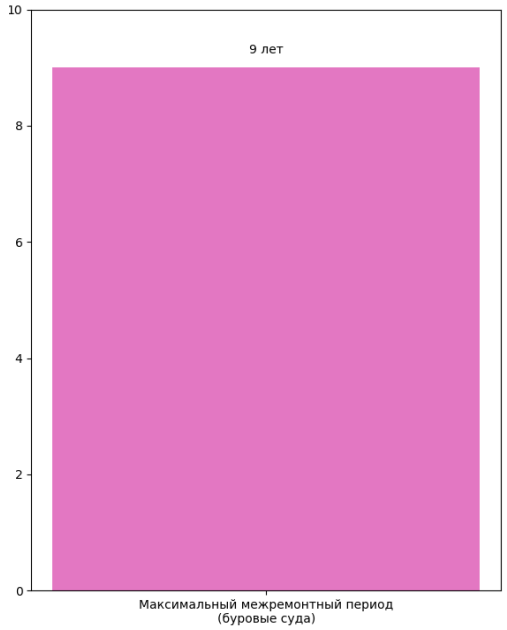


Рис. 1. Применение движительно-рулевых комплексов системы Azipod на морских судах [1,2]

а) типы судов; б) эксплуатационное время наработки; в) межремонтный эксплуатационный период

Объектом экспериментального исследования являются многоканальные записи вибрации, полученные от судовой штатной (заводской) системы виброконтроля «ProCheck» азиподов, установленных на морском судне-снабженце ледового класса в условиях его реальной эксплуатации, включая работу во льдах. Система оснащена штатными датчиками вибрации, установленными на подшипниковых опорах азиподов. Регистрация сигналов осуществлялась встроенной системой диагностики с частотой дискретизации 2560 Гц по четырём каналам (три радиальных и один осевой датчик). Временные реализации содержат по 8192 отсчёта, что соответствует длительности 3,2 секунды. В работе использованы данные, зафиксированные в различные периоды эксплуатации, что позволило охватить широкий диапазон режимов работы (изменение оборотов и угла поворота азипода) и внешних условий. Из таблицы 1 видно, что сигналы от датчиков вибрации записываются в bin-файлы, имеют аналоговый интерфейс и размерность g. Сигналы от датчиков частоты вращения и угла поворота азипода являются дополнительными каналами и записываются в xml-файлы. Погрешность всей измерительной системы «ProCheck» не превышает ±5%. Исследуемые азиподы находятся в нормальном техническом состоянии, проходят периодическое обслуживание и инспекции судового Регистра.

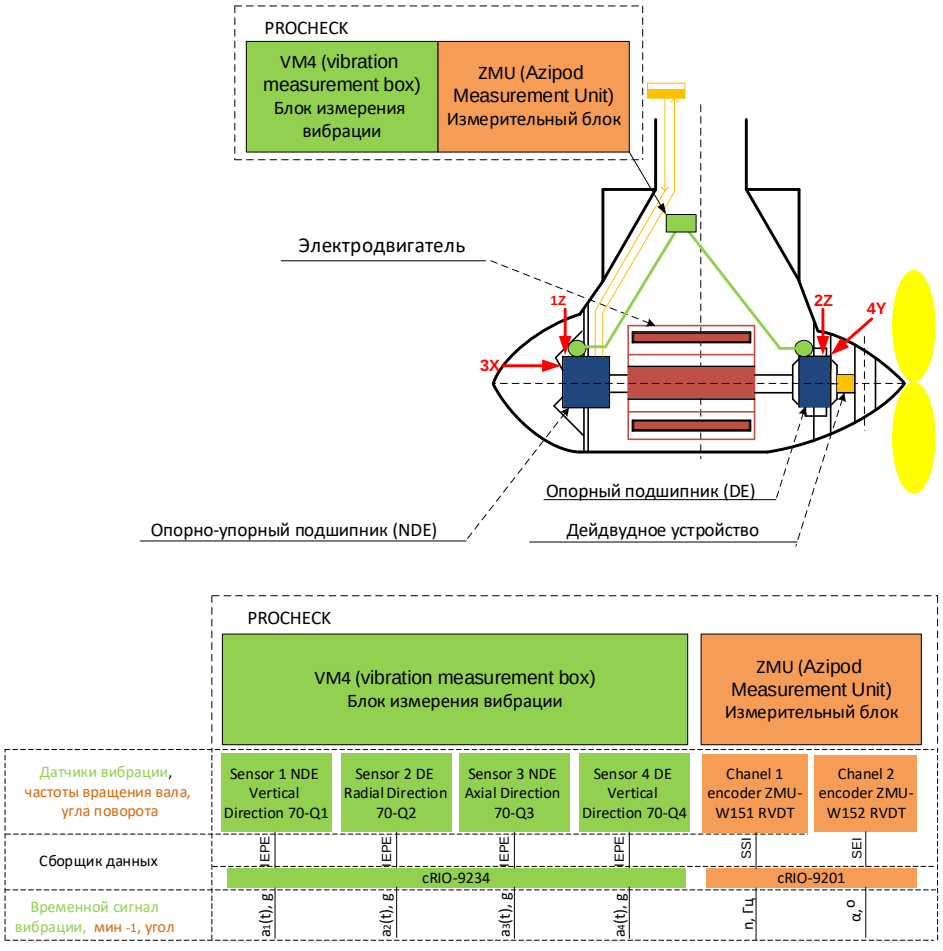


Рис. 2. Принципиальная схема всего цикла обработки измерительных данных движительно-рулевых комплексов

Таблица 1.

Типы датчиков, установленных на движительно-рулевых комплексов системы AZIPOD фирмы "ABB" модели

№	Параметр	Тип датчика	Интерфейс / сигнал	Погрешность	Измерения	Каналы / позывной	Примечание
1	Вибрация	Пьезоэлектрический (IEPE)	Аналоговый (±5 В), через NI 9234	±2%;	Виброускорения временной сигнал, g	sensor_id="1" (NDE) вертикальный z sensor_id="3" (NDE) осевой x sensor_id="2" (DE) вертикальный z sensor_id="4" (DE) осевой x	Bin-файл
3	Частота вращения	Абсолютный энкодер	SSI (тактовый сигнал/данные, 24 бита)	±3%	Гц	Канал 1/ drehzahl	xml-файл
4	Угол поворота	Энкодер RVDT / Sin-Cos	Аналоговый сигнал ±10 В (sin/cos)	±3%	Вольт	Канал 2 / add_channel_id="2"	xml-файл

Методические аспекты исследования

Своевременная диагностика требует анализа больших массивов данных, получаемых с систем непрерывного мониторинга (например, ProCheck фирмы Schaeffler). Исходные данные выгружаются в виде архивов .x5, содержащих как конфигурационную информацию, так и результаты измерений. Для дальнейшего анализа необходима предварительная валидация данных – отсеивание технически некорректных, неполных или дублирующихся записей, а также записей, полученных в нештатных режимах работы (по оборотам и углу поворота). Настоящая методика описывает правила такой валидации и способы их программной реализации на языке Python с использованием открытых библиотек.

Система «ProCheck» (FAG Industrial Services) предназначена для непрерывного контроля вибрации вращающегося оборудования. Она способна обрабатывать сигналы до 16 датчиков вибрации и до 8 дополнительных каналов (частота вращения, угол поворота, температура и др.). Архив данных .x5 (или .zip) представляет собой пакет, содержащий файлы, в которых содержится информация (таблица 2).

Таблица 2

Источники данных системы

№	Файл	Элемент / атрибут
1	«procheck_device.xml» идентификация устройства	device_name определяет борт: PORT или STBD)
2	«device_config.xml» настройки датчиков и дополнительных каналов	для датчиков (tbl_sensor): sensor_fktr – чувствительность (значение 98.0665 для ICP-датчиков); unit – единицы измерения (значение "1" означает g); для дополнительных каналов (tbl_add_channel): sensor_type – тип сигнала (9 – обороты, 4 – угол); sensor_fktr – коэффициент преобразования (25 для оборотов, 1 для угла); unit – единицы измерения ("7" – об/мин, "5" – вольты)
3	«procheck_data_signal.xml» метаданные каждого измерения	measure_time – время измерения (Excel-формат, преобразуется в datetime); sensor_id – номер датчика (1,2,3,4); sample_rate – частота дискретизации (Гц), ожидается 2560.0; ts_nr_of_samples – количество отсчётов в сигнале, ожидается 8192; drehzahl – частота вращения (об/с), при наличии умножается на 60 для получения об/мин; дополнительный канал add_channel_id="1" – среднее значение оборотов (об/мин) в атрибуте avg_value; дополнительный канал add_channel_id="2" – среднее значение угла (В) в атрибуте avg_value
4	«monitoring_config.xml» параметры мониторинга	"T-MON" или "Ref._2-200"; pre_alarm_level – предупредительный уровень (м/с); main_alarm_level – аварийный уровень (м/с); lower_level – нижняя граница частотной полосы (Гц); upper_level – верхняя граница частотной полосы (Гц); raw_mod_flag – тип сигнала (0 – raw, 1 – demodulated); nr_of_samples_raw – количество отсчётов в сигнале (8192); (для подшипников) tbl_mon_cfg_bearings содержит lag_freq_aussenring (BPFO), lag_freq_innenring (BPFI), lag_freq_waelzkoerper (BSF), lag_freq_kaefig (FTF)
5	«procheck_data_signal.bin» бинарный файл с вибрационным сигналом	Не имеет атрибутов; содержит массив 64-битных чисел с плавающей точкой (порядок little-endian), представляющих ускорение в единицах *g*. Ожидаемый размер файла – 65536 байт, что соответствует 8192 отсчётам

После распаковки архива и идентификации всех файлов производится извлечение числовых данных. Основу анализа составляют бинарные файлы сигналов (.bin) и соответствующие им XML-файлы метаданных (procheck_data_signal.xml). Каждая пара «XML + BIN» соответствует одному измерению с одного датчика.

Система ProCheck записывает данные с четырёх датчиков вибрации (каналы 1–4) практически одновременно. Временная метка «measure_time» в XML-файлах имеет точность до миллисекунд. Уникальным моментом называется группа из четырёх измерений (по одному от каждого датчика), у которых значения «measure_time» совпадают с точностью до миллисекунды. Такую группу из четырёх измерений с каждого датчика с одинаковым временем назовём «уникальным моментом». Только такие полные наборы (уникальные моменты) могут использоваться для дальнейшего анализа, поскольку позволяют сопоставить вибрацию по всем направлениям (вертикальные, горизонтальный, осевой) со всех подшипников в один и тот же момент работы азипода.

Для каждого измерения из XML-файла извлекаются:

– «measure_time» преобразуется в объект datetime;

– «sensor_id» номер датчика (1,2,3,4);

– «sample_rate» частота дискретизации (должна быть 2560 Гц);

– «ts_nr_of_samples» количество отсчётов (должно быть 8192);

– обороты сначала ищется дополнительный канал с «add_channel_id="1"», берётся «avg_value» (об/мин); если его нет, используется «drehzahl (об/с)», которое умножается на 60;

– угол поворота дополнительный канал с «add_channel_id="2"», поле «avg_value» (вольты).

Эти значения можно использовать для валидации (проверки режима работы) и для последующей маркировки спектров.

Для чтения бинарного файла, и его проверки на полноту данных, а также для дальнейшего преобразования сигнала в спектр используется язык программирования Python с его основными библиотеками: «numpy», «os», «scipy.fft».

Библиотека «numpy» служит для чтения бинарного файла. Она позволяет загрузить массив 64-битных чисел с плавающей точкой (little-endian) и проверить его длину (ожидается 8192 отсчёта).

Библиотека «os» служит для проверки полноты данных. Ожидаемый размер файла – 65536 байт, что гарантирует его целостность и наличие полного массива.

Библиотека «scipy.fft» (или «numpy.fft») служит для преобразования временного сигнала в частотную область (спектр). БПФ позволяет выделить частотные составляющие, рассчитать амплитуды и далее получить СКЗ виброскорости.

Таким образом, Python с указанными библиотеками обеспечивает полный цикл обработки: от проверки целостности файла до спектрального анализа. На рисунке 3 представлен фрагмент кода на Python, реализующий проверку размера, чтение данных, контроль длины и быстрое преобразование Фурье (БПФ).

После данного этапа экспериментального исследования возникает необходимость проверки данных (валидации) для их дальнейшей обработки. Атрибутами валидации служат: обороты, угол, размер файла, нарушение полноты набора датчиков (уникальные моменты времени), дубликаты (несколько записей для одного датчика в одно и то же время), а также соответствие конфигурации датчиков и параметров мониторинга эталонным значениям. Если хотя бы один из этих атрибутов не соответствует заданным критериям, запись признаётся бракованной и исключается из дальнейшего анализа.

```python
import numpy as np
import os
from scipy.fft import fft
# Размер файла
file_size = os.path.getsize('procheck_data_signal.bin')
# Чтение бинарного файла
data = np.fromfile('procheck_data_signal.bin', dtype='<f8')
# Количество отсчётов
num_samples = len(data)
# БПФ
fft_vals = fft(data)
freqs = np.fft.fftfreq(num_samples, 1/2560.0)
```

Рис. 3. Пример фрагмента кода на Python, реализующего проверку размера, чтение данных, контроль длины и быстрое преобразование Фурье (БПФ)

Отдельного рассмотрения требуют дубликаты – записи с одинаковыми measure_time и sensor_id. Такие дубликаты не могут быть результатом корректного измерения за миллисекунды; они являются артефактом (сбой записи, повторное сохранение) и, как правило, имеют аномально высокое среднеквадратичное значение (СКЗ) виброскорости. Поэтому в процессе валидации для каждой пары («measure_time», «sensor_id») оставляется только запись с наименьшим СКЗ, а остальные помечаются как брак. Это правило включено в таблицу 2 и в логику обработки дубликатов. На рисунке 4 представлен пример фрагмента кода на Python, реализующего валидацию данных.

```python
def validate_measurements(df):
    # df содержит колонки: measure_time, sensor_id, rpm, angle, file_size, signal_path, ...
    # 1. Проверка оборотов и угла
    rpm_ok = (df['rpm'] >= 105) & (df['rpm'] <= 250)
    angle_ok = (df['angle'] >= 3) & (df['angle'] <= 7)
    # 2. Проверка размера файла
    size_ok = df['file_size'] == 65536
    # 3. Группировка по времени для проверки полноты датчиков и дубликатов
    df['valid'] = rpm_ok & angle_ok & size_ok
    # Полные моменты (4 датчика)
    def check_full_moment(group):
        sensors = set(group['sensor_id'])
        return len(sensors) == 4
    full_moments = df.groupby('measure_time').filter(check_full_moment)['measure_time'].unique()
    df['full_moment'] = df['measure_time'].isin(full_moments)
    df['valid'] = df['valid'] & df['full_moment']
    # Дубликаты: оставляем запись с минимальным СКЗ (rms)
    df['rms'] = df['rms'] if 'rms' in df else 0
    df_sorted = df.sort_values('rms')
    df_clean = df_sorted.drop_duplicates(subset=['measure_time', 'sensor_id'], keep='first')
    df['valid'] = df.index.isin(df_clean.index) & df['valid']
    return df
```

Рис. 4. Пример фрагмента кода на Python, реализующего валидацию данных «Procheck» автоматизированной система замеров вибрации азиподов

Обработка вибрационных данных, полученных с датчиков, установленных на корпусах подшипников азипода, включает следующие аспекты. Контроль вибрации подшипников осуществляется расчётом параметров широкополосной и узкополосной вибрации. Широкополосная вибрация измеряется в диапазоне 10–1000 Гц (конфигурация T-MON). Значения вибрации соответствуют настройкам системы «ProCheck»: предупредительный уровень – 0,00284 м/с (2,84 мм/с), аварийный уровень – 0,0071 м/с (7,1 мм/с). Также используется диапазон частот 2–200 Гц (Ref._2-200), для которого системой ProCheck рекомендованы следующие значения:

предупредительный уровень – 11,2 мм/с, аварийный уровень – 18 мм/с.

Узкополосная вибрация контролируется в частотных полосах, соответствующих лопастной частоте (BFF) и её гармоникам, а также подшипниковым частотам. Подшипниковые частоты включают: BPFO (частота перекатывания тел качения по внешней обойме), BPFI (частота перекатывания по внутренней обойме), BSF (частота вращения тела качения) и FTF (частота вращения сепаратора). Эти частоты прямо пропорциональны частоте вращения вала по формуле.

$$f_o = \frac{RPM}{60}$$

где fo это оборотная частота вращения вала ротора азипода.

Характерные частоты неисправностям подшипников азипода вычисляются по формулам:

$$\mathrm{BPFO} = f_o \cdot k_{\mathrm{BPFO}}$$
$$\mathrm{BPFI} = f_o \cdot k_{\mathrm{BPFI}}$$
$$\mathrm{BSF} = f_o \cdot k_{\mathrm{BSF}}$$
$$\mathrm{FTF} = f_o \cdot k_{\mathrm{FTF}}$$

Коэффициенты $k_{\mathrm{BPFO}}, k_{\mathrm{BPFI}}, k_{\mathrm{BSF}}, k_{\mathrm{FTF}}$ определяются геометрией подшипников. Для подшипников азипода, используемых в системе ProCheck, из файла monitoring_config.xml получены следующие значения (таблица 3).

Таблица 3

Коэффициенты подшипниковых частот азипода

Подшипник	K_BPFO	K_BPFI	K_BSF	K_FTF
NDE (AFZ 0525)	8.98	11.02	3.42	0.449
DE (C30/600 KMB)	14.62	17.41	5.71	0.457

Анализ литературных источников показывает, что в настоящее время активно развиваются исследования систем мониторинга и диагностики методами неразрушающего контроля, а также методом конечных элементов.

В работе [3] представлены исследования базовых принципов работы азиподных пропульсивных систем, показаны конструктивные особенности и обоснована необходимость вибрационного контроля для обеспечения надёжности. В работе [4] выполнены моделирования азиподов в сложных эксплуатационных условиях, получены результаты, позволяющие обосновать выбор частотных диапазонов для мониторинга вибрации.

В работах [6,7] проведено динамическое моделирование осевой вибрации гребных валов и исследованы возбуждающие силы гребного винта; доказано, что лопастная частота (BFF) является доминирующей в спектре вибрации и может служить индикатором резонансных явлений. В работе [6] показана возможность оптимизации резонансных гасителей для снижения передачи вибрации на корпус судна, что подтверждает важность контроля резонансных частот.

В исследовании [9] с помощью конечно-элементного анализа получены данные о вибрации гребного вала в диапазоне частот 2–200 Гц, что обосновывает необходимость расширения контролируемого диапазона вниз для тихоходных машин. В работе [10] изложены классические методы динамики конструкций, применяемые для расчёта собственных частот и форм колебаний.

В работе [11] представлены фундаментальные основы спектрального анализа, метода огибающей и диагностики подшипников качения, что легло в основу алгоритмов обработки вибрационных сигналов.

Актуальность настоящего исследования обусловлена переходом от классической вибродиагностики (разовые измерения переносным прибором) к обработке больших массивов архивных данных, накопленных системами непрерывного мониторинга. Совокупность приведённых исследований подтверждает необходимость разработки комплексной методики валидации и анализа вибрационных данных, получаемых с систем непрерывного мониторинга типа «ProCheck», и определяет основные параметры контроля: оборотную частоту, лопастную частоту, подшипниковые частоты и широкополосные уровни виброскорости.

При этом важно отметить, что анализ вибрационных данных в рамках настоящей работы выполняется не в классических условиях, когда диагност самостоятельно проводит измерения с помощью переносного прибора. Вместо этого используются архивные данные, зафиксированные системой непрерывного мониторинга «ProCheck». Обработка и интерпретация этих данных осуществляется средствами языка программирования Python с применением специализированных библиотек («numpy», «scipy», «pandas»). Такой подход позволяет автоматизировать процедуру валидации, извлечения спектральных характеристик и диагностики дефектов, обеспечивая высокую воспроизводимость результатов и возможность обработки больших объёмов данных.

Результаты исследования

На рисунке 5 представлен список архивов, сгенерированных системой «ProCheck» для левого и правого борта в реальных условиях эксплуатации азиподов. Из рисунка 5 видно, что доля измерений, прошедших условия валидации и способных участвовать в анализе вибрации, составляет не более около 50 %, а иногда даже около 30 %.

На рисунке 6 представлены спектры вибрации азиподов в наиболее распространённых режимах работы. Из рисунков видно, что заявленные системой диагностики диапазоны оборотов азипода во время замеров вибрации не совпадают с пиком лопастной частоты, который является доминирующим в спектре. Анализ спектров вибрации показал, что оборотная и лопастная частоты азипода имеют максимальные амплитуды и преобладают в спектре.

Такой результат подтверждается рядом работ, в которых были сделаны аналогичные выводы о влиянии лопастной и первой оборотной гармоник на весь спектр [12–16]. В связи с этим можно утверждать, что для условий валидации необходимо уточнять частоту вращения азипода, выбирая между этими двумя параметрами. Для этого была написана программа, которая находит максимальный пик в диапазоне, расширенном на 5 % относительно минимальных и максимальных оборотов, зафиксированных при измерениях. Программа показала хороший результат и предоставила автору возможность графически подтверждать выбранные частоты для валидации оборотной частоты.

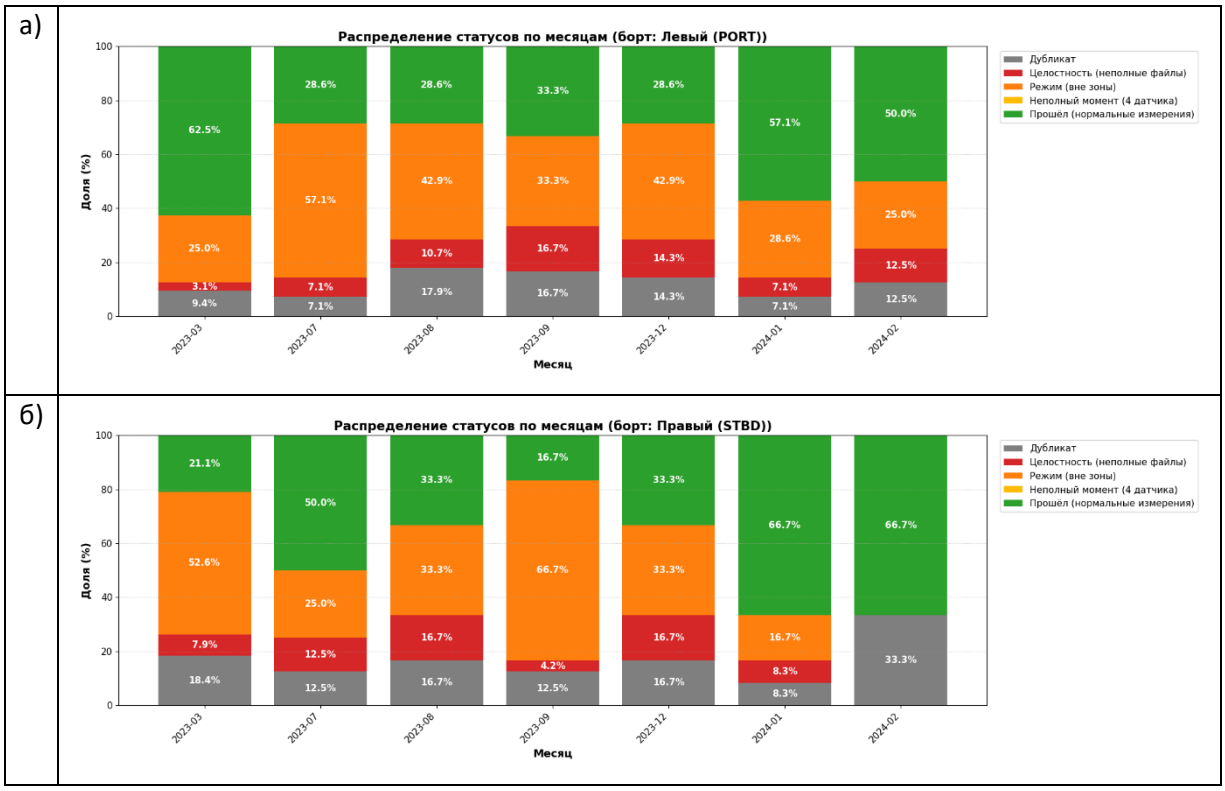
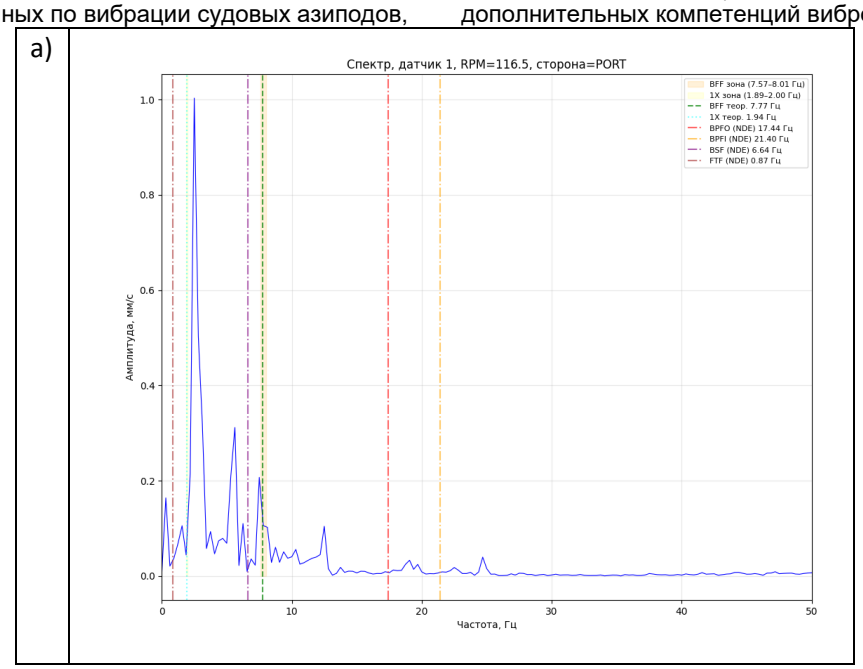


Рис. 5. Список архивов, сгенерированных системой «ProCheck» для левого и правого борта в реальных условиях

На рисунке 7 представлены параметры вибрации в широкой полосе частот 2–200 Гц, рекомендованной заводом-изготовителем, для морского судна, работающего в ледовых условиях в течение двух лет, а также показаны доверительные интервалы. Интервалы были рассчитаны как 10-й и 90-й процентили (непараметрический метод) с помощью функции numpy.percentile в Python для распределения долей диагностических паттернов в нормальных условиях эксплуатации (при отсутствии дефектов). Представленные данные являются уникальными для построения диагностических систем и баз данных по вибрации судовых азиподов, эксплуатирующийся в реальных условиях, включая работу во льдах.

Анализ вибрации судовых азиподов со встроенной заводской системой вибрационного контроля и диагностики невозможно провести без знания языка программирования Python и специализированных библиотек, таких как «NumPy» (математические операции и работа с массивами), «SciPy» (цифровая фильтрация, спектральный анализ), «Pandas» (обработка метаданных и табличных данных) и «Matplotlib» (визуализация спектров и графиков), а также без получения дополнительных компетенций вибродиагноста



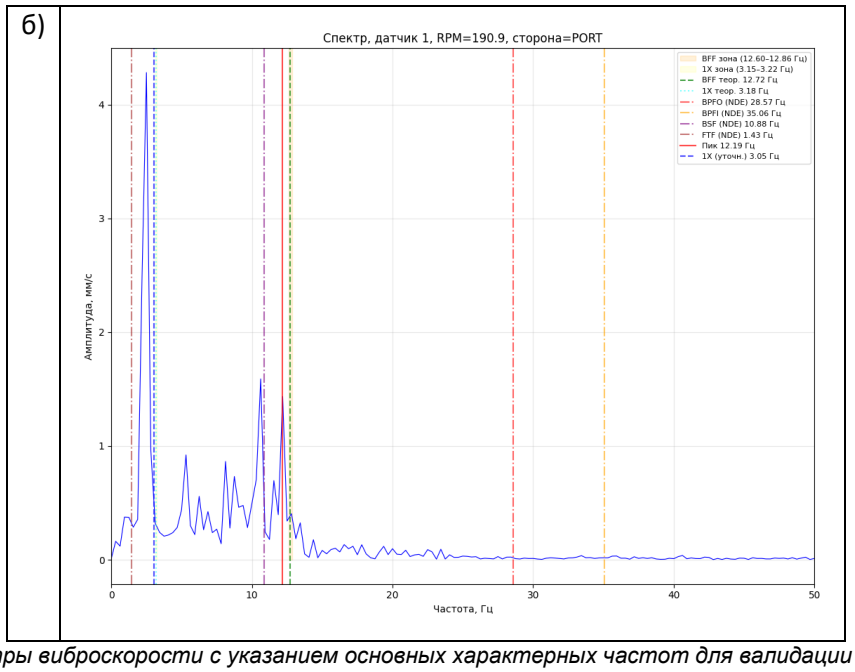
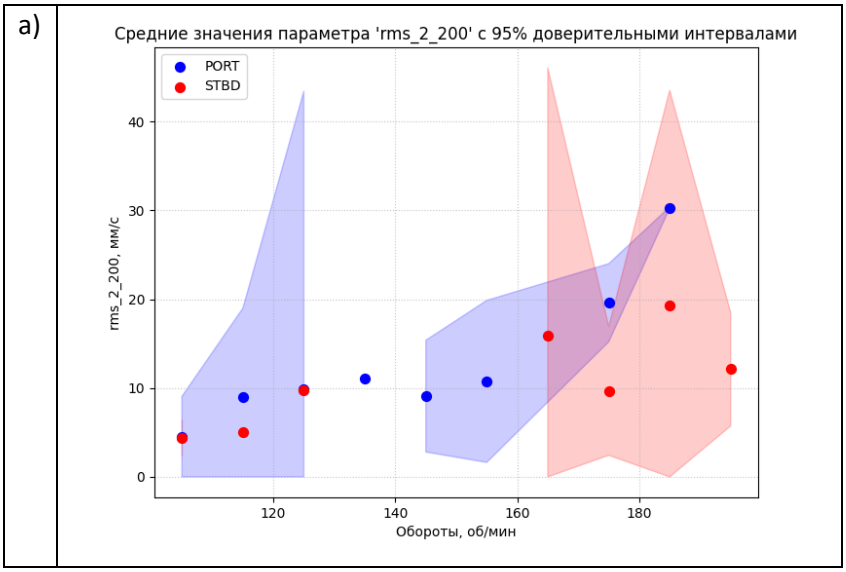


Рис. 6. Спектры виброскорости с указанием основных характерных частот для валидации данных левого и правого борта азиподов

Таким образом, проведение глубокого анализа вибрации, включая построение исторических трендов и детальную диагностику состояния подшипников судового движителя, в полном объёме возможно только с использованием специализированной диагностической платформы производителя (FAG/Schaeffler). Однако алгоритмы и методы, применяемые производителем для диагностики, являются коммерческой тайной и не раскрываются конечным пользователям. Это ограничивает возможности эксплуатирующих организаций по самостоятельной обработке и интерпретации накопленных данных. Кроме того, зависимость от программного обеспечения иностранного производителя создаёт риски в условиях санкционных ограничений, что актуализирует задачи импортозамещения и обеспечения технологической безопасности морской отрасли РФ.

В связи с этим полученные в данной статье результаты, не зависящие от закрытых алгоритмов производителя, позволяют пользователям самостоятельно выполнять валидацию, спектральный анализ и диагностику по архивам «ProCheck», что является существенным преимуществом с точки зрения прозрачности, адаптируемости, а также снижения зависимости от иностранного ПО.

Данное исследование знаменует переход от классического эксперимента (выезд диагноста, разовые измерения) к алгоритмико-программному анализу больших архивных данных. Это требует от инженера-диагноста не только знаний в области вибрации, но и цифровых компетенций (программирование, работа с базами данных, статистическая обработка). Таким образом, работа представляет собой элемент цифровой трансформации вибродиагностики, где ключевая роль принадлежит правильной валидации данных, основанной на многолетнем практическом опыте.



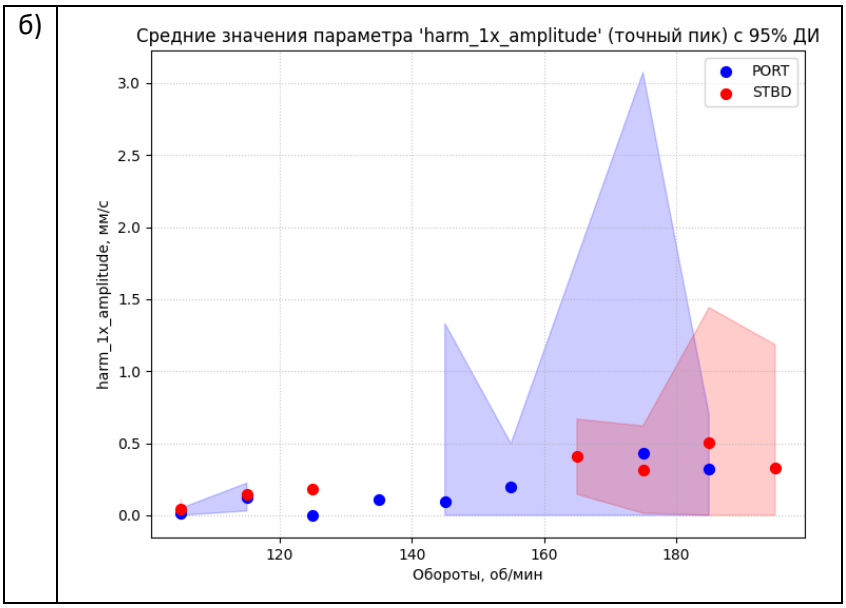


Рис. 7. Основные параметры вибрации в широком диапазоне режимов работы левого и правого борта азиподов

Заключение

Разработанная методика была применена к двухлетним архивам вибромониторинга морского судна ледового класса. Установлено, что доля измерений, прошедших полную валидацию, составляет 30–50 % от общего объёма, что подтверждает необходимость автоматизированной очистки данных. В спектрах выявлены доминирующие гармоники – 1X (оборотная) и BFF (лопастная), что согласуется с литературными данными.

Практическая значимость работы заключается в возможности самостоятельной обработки архивов «ProCheck» эксплуатирующими организациями без привлечения коммерческого ПО производителя, что способствует снижению затрат на диагностику и повышению технологической независимости морской отрасли РФ. Полученные результаты могут быть внедрены в регламенты технического обслуживания судов с азиподами и использованы в учебных курсах по цифровой вибродиагностике.

Перспективы дальнейших исследований включают использование методов машинного обучения для автоматической классификации дефектов, интеграцию разработанного инструмента в системы предиктивной аналитики, создание веб-сервиса для удалённой валидации архивов, а также адаптацию методики для других систем мониторинга элементов судовых энергетических установок.

Литература

1. Roivainen J., Viheriälehto S. Silent marine research with Azipod propulsion [Презентация]. ABB Marine & Ports; 2023. 22 с. URL: https://irso.info/wp-content/uploads/09-Silent-marine-research-with-azipod-propulsion-Janne-Roivanen.pdf (датаобращения: 27.02.2026).
2. ABB Oy. Azipod® Condition Monitoring Retrofit [Брошюра]. 2011. 2 с. URL: https://resources.news.e.abb.com/attachments/published/12861/en-US/76D2F418AD41/15333-Azipod-Condition-Monitoring-Retrofit-lowres.pdf (дата обращения: 27.02.2026).
3. Pakaste R., Laukia K., Wilhelmson M.J. Azipod propulsion systems for marine vessels // Electro-Technology. 2000. Vol. 3. P. 40–43.
4. Islam M.F. Modeling techniques of puller podded propulsor in extreme conditions // Journal of Ship Research. 2017. Vol. 61. P. 230–255..
5. Wang W., Zhao D., Guo C.Y., Pang Y.J. Analysis of Hydrodynamic Performance of L-Type Podded Propulsion with Oblique Flow Angle // Journal of Marine Science and Engineering. 2019. Vol. 7. P. 51..
6. Li C., Huang X., Hua H. Dynamic modeling and analysis of axial vibration of a coupled propeller and shafting system // Journal of Mechanical Science and Technology. 2016. Vol. 30. P. 2953–2960.
7. Zou D., Zhang J., Ta N., Rao Z. Study on the axial exciting force characteristics of marine propellers considered the effect of the shafting and blade elasticity // Applied Ocean Research. 2019. Vol. 89. P. 141–153.
8. Dylejko P.G., Kessissoglou N.J., Yan T., Norwood C.J. Optimisation of a resonance changer to minimise the vibration transmission in marine vessels // Journal of Sound and Vibration. 2007. Vol. 300. P. 101–116.
9. Huang Q., Zhang C., Jin Y., Yuan C., Yan X. Vibration analysis of marine propulsion shafting by the coupled finite element method // Journal of Vibroengineering. 2015. Vol. 17. P. 3392–3403.
10. Clough R.W., Penzien J., Griffin D.S. Dynamics of Structures. New York: Computers and Structures, 1995. P. 377–395.
11. Randall R.B. Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications. Chichester: Wiley, 2011.

12. Макаров В.В., Троицкий А.В. Метод оценки режима работы и технического состояния судового оборудования по вибрационным характеристикам // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — Спец. вып. 1. — С. 189–194.
13. 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.
14. Jabari F. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electric Propulsion Systems in Marine Transportation // Advances in Sustainable Energies and Environment. — 2026. — Vol. 1, No. 1. — P. 45–52.
15. Jürgens D., Palm M. Efficient and Safe DP through Enhanced CMS Analyses and Electric Thrust Control // Journal of the JIME. — 2022. — Vol. 57, No. 2. — P. 46–56.
16. Zambon A., et al. A Measurement System to Monitor Propulsion Performance and Ice-Induced Shaftline Dynamic Response of Icebreakers // Journal of Marine Science and Engineering. — 2022. — Vol. 10, No. 4. — Art. 522.

References

1. Roivainen J., Viheriälehto S. Silent marine research with Azipod propulsion [Презентация]. ABB Marine & Ports; 2023. 22 с. URL: https://irso.info/wp-content/uploads/09-Silent-marine-research-with-azipod-propulsion-Janne-Roivanen.pdf (датаобращения: 27.02.2026).
2. ABB Oy. Azipod® Condition Monitoring Retrofit [Брошюра]. 2011. 2 с. URL: https://resources.news.e.abb.com/attachments/published/12861/en-US/76D2F418AD41/15333-Azipod-Condition-Monitoring-Retrofit-lowres.pdf (дата обращения: 27.02.2026).
3. Pakaste R., Laukia K., Wilhelmson M.J. Azipod propulsion systems for marine vessels // Electro-Technology. 2000. Vol. 3. P. 40–43.
4. Islam M.F. Modeling techniques of puller podded propulsor in extreme conditions // Journal of Ship Research. 2017. Vol. 61. P. 230–255..
5. Wang W., Zhao D., Guo C.Y., Pang Y.J. Analysis of Hydrodynamic Performance of L-Type Podded Propulsion with Oblique Flow Angle // Journal of Marine Science and Engineering. 2019. Vol. 7. P. 51..
6. Li C., Huang X., Hua H. Dynamic modeling and analysis of axial vibration of a coupled propeller and shafting system // Journal of Mechanical Science and Technology. 2016. Vol. 30. P. 2953–2960.
7. Zou D., Zhang J., Ta N., Rao Z. Study on the axial exciting force characteristics of marine propellers considered the effect of the shafting and blade elasticity // Applied Ocean Research. 2019. Vol. 89. P. 141–153.
8. Dylejko P.G., Kessissoglou N.J., Yan T., Norwood C.J. Optimisation of a resonance changer to minimise the vibration transmission in marine vessels // Journal of Sound and Vibration. 2007. Vol. 300. P. 101–116.
9. Huang Q., Zhang C., Jin Y., Yuan C., Yan X. Vibration analysis of marine propulsion shafting by the coupled finite element method // Journal of Vibroengineering. 2015. Vol. 17. P. 3392–3403.
10. Clough R.W., Penzien J., Griffin D.S. Dynamics of Structures. New York: Computers and Structures, 1995. P. 377–395.
11. Randall R.B. Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications. Chichester: Wiley, 2011.
12. Makarov V.V., Troickij A.V. Metod ocenki rezhima raboty i tekhnicheskogo sostoyaniya sudovogo oborudovaniya po vibracionnym harakteristikam [Method for assessing the operating mode and technical condition of ship equipment based on vibration characteristics] // Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. — 2019. — Spec. vyp. 1. — S. 189–194
13. 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]. Ekspluataciya morskogo transporta. 2022. № 2 (103). S. 76-79.
14. Jabari F. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electric Propulsion Systems in Marine Transportation // Advances in Sustainable Energies and Environment. — 2026. — Vol. 1, No. 1. — P. 45–52.
15. Jürgens D., Palm M. Efficient and Safe DP through Enhanced CMS Analyses and Electric Thrust Control // Journal of the JIME. — 2022. — Vol. 57, No. 2. — P. 46–56.
16. Zambon A., et al. A Measurement System to Monitor Propulsion Performance and Ice-Induced Shaftline Dynamic Response of Icebreakers // Journal of Marine Science and Engineering. — 2022. — Vol. 10, No. 4. — Art. 522.

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.

ИНФОРМАЦИЯОБАВТОРАХ / 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 12.05.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.06.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 24.06.2026.

Научная статья
УДК 621.438.165-125
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.042

Влияние ограничений по материалам и технологиям на выбор параметров морского газотурбинного двигателя простого цикла

Погодин Ю.М.[1] yu_pogodin@mail.ru, **Смирнов А.А.**[1] smir70@mail.ru, **Безухов А.П.**[1] bezukhov@mail.ru,
Сандовский А.А.[1] sasha.sandovskiy@mail.ru
[1]Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. При моделировании цикла ГТУ важно корректно оценить необходимый относительный расход воздуха на охлаждение деталей газовой турбины, который во многом определяется используемыми материалами и технологиями изготовления деталей проточной части. Указанные факторы могут оказывать заметное влияние на результаты моделирования и оптимизации параметров цикла ГТУ на ранних стадиях проектирования, ограничивать достижимые значения основных показателей двигателя.
Цель. На основе результатов расчетных исследований продемонстрировать влияние доступных производителю материалов и технологий на возможные достижимые значения важнейших внешних параметров морской ГТУ простого цикла уже на ранних стадиях проектирования.
Методы. Использованы расчетные модели для определения параметров цикла ГТУ и относительного расхода охлаждающего воздуха в зависимости от принятого ресурса, свойств материала лопаток, наличия термобарьерных покрытий и параметров двигателя.
Результаты. Выполненное на уровне концептуального проектирования расчетное исследование продемонстрировало сильное влияние на оптимальные значения параметров цикла ГТУ допустимого значения температуры поверхности материала, которое определяется свойствами материала лопаток и технологиями изготовления. Достоверность полученных результатов подтверждена сравнением с известными параметрами морских ГТД ведущих мировых производителей.
Заключение. Анализ результатов исследования позволяет сформулировать основные требования к параметрам цикла ГТУ, параметрам ее элементов и технологиям для получения характеристик морского ГТД пятого поколения.
Ключевые слова: морские газотурбинные двигатели, простой термодинамический цикл, расход воздуха на охлаждение, ограничения на технологии и материалы деталей проточной части, влияние на выбор рациональных значений параметров цикла на ранней стадии проектирования морской энергетической установки.
Для цитирования: Погодин Ю.М., Смирнов А.А., Безухов А.П., Сандовский А.А. Влияние ограничений по материалам и технологиям на выбор параметров морского газотурбинного двигателя простого цикла, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 154—161. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.042

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.042

Influence of material and technology restrictions on the selection of parameters of a simple cycle marine gas turbine engine

Yuri M. Pogodin[1] yu_pogodin@mail.ru, **Alexander A. Smirnov**[1] smir70@mail.ru,
Andrey P. Bezukhov[1] bezukhov@mail.ru, **Alexander A. Sandovsky**[1] sasha.sandovskiy@mail.ru
[1]St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. During a gas turbine cycle modeling, it is important to accurately estimate the required relative air flow rate for cooling gas turbine components. This relative air flow is strongly determined by the materials and the technologies used for the manufacturing of engine components. These factors can have a significant impact on the results of modeling and optimization of gas turbine cycle parameters in the early design stages, limiting the achievable values of key engine performance indicators.
Objective: Based on the results of computational studies, to demonstrate the influence of materials and technologies available to the manufacturer on the possible achievable values of the most important external parameters of a simple-cycle marine gas turbine unit already at the early phases of design.
Methods: computational models were used to determine the gas turbine cycle parameters and relative cooling air flow rates depending on the assumed service life, blade material properties, the presence of thermal barrier coatings, and engine parameters.
Results: A conceptual design study demonstrated the significant influence of the permissible surface temperature of materials on the optimal gas turbine cycle parameters. The permissible surface temperature is determined by the blade material properties and manufacturing technologies. The validity of the obtained results was confirmed by comparison with known parameters of marine gas turbine engines from leading global manufacturers.
Conclusion: Analysis of the research results allows us to formulate the basic requirements for the gas turbine cycle parameters, the parameters of engine components, and technologies for obtaining the characteristics of a fifth-generation marine gas turbine engine.

© Погодин Ю.М., Смирнов А.А., Безухов А.П., Сандовский А.А. 2026

Key words: Marine gas turbine engines, simple thermodynamic cycle, air flow for cooling, limitations on technologies and materials of flow path components, influence on the choice of rational values of cycle parameters at the early stage of designing a marine power plant.
For citation: Yuri M. Pogodin, Alexander A. Smirnov, Andrey P. Bezukhov, Alexander A. Sandovsky Influence of material and technology restrictions on the selection of parameters of a simple cycle marine gas turbine engine, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 154—161. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.042

Введение

Для российского морского энергомашиностроения актуальной задачей является разработка легкого, надежного, экономически эффективного двигателя с мощностями от 1 до 40 МВт. Поэтому важно выполнять предварительные проектно-расчетные исследования для обоснования выбора параметров таких двигателей. В нашем случае в качестве примера будет рассматриваться перспективный газотурбинный двигатель простого цикла.

Расчетные модели, которые используются на ранних стадиях проектирования газотурбинных установок (ГТУ), с одной стороны должны обеспечивать достаточную точность получаемых результатов, с другой стороны использовать доступную на данном этапе проектирования исходную информацию. В частности, при моделировании цикла ГТУ важно корректно оценить необходимый относительный расход воздуха на охлаждение деталей газовой турбины, который во многом определяется используемыми материалами и технологиями изготовления деталей проточной части. Все указанные факторы могут оказывать заметное влияние на результаты моделирования и оптимизации параметров цикла ГТУ на ранних стадиях проектирования, ограничивать достижимые значения основных показателей двигателя.

Цель работы и решаемые задачи. Цель: на основе результатов расчетных исследований продемонстрировать существенное влияние доступных производителю материалов и технологий на возможные достижимые значения важнейших внешних параметров морской ГТУ простого цикла уже на ранних стадиях проектирования.

Решаемые задачи. На уровне концептуального проектирования выполнить расчетное исследование влияния параметров цикла на экономичность морских газотурбинных двигателей простого цикла мощностью 30 МВт, с учетом принятого ресурса, свойств материала лопаток, применения термобарьерных покрытий и конвективно-пленочной схемы охлаждения. По результатам расчетных исследований обосновать выбор рациональных параметров цикла морских газотурбинных установок, работающих по простому термодинамическому циклу, для номинальной мощности 30 МВт с учетом доступных материалов и технологий.

Объект исследования. В расчетных исследованиях рассматривается морской газотурбинный двигатель с номинальной мощностью 30 МВт, выполненный по двухкаскадной схеме и работающий по простому термодинамическому циклу Брайтона. В качестве ближайших прототипов могут рассматриваться морские ГТД поколения 3 формы «Сатурн» М90ФР [4] и поколения 4, 4+ фирмы GE LM2500+; LM2500+G4 и фирмы RR MT30. Ориентировочные значения некоторых параметров этих двигателей приведены в рекламных проспектах фирм-производителей [1, 2] и в обзорах [3, 4]. Степени повышения давления в цикле для упомянутых ГТД по данным указанных источников изменяются в диапазоне от 18 до 28. КПД по ISO от 0,35 до 0,406. Номинальные мощности составляют 20 – 36 МВт; температура газа за турбиной 740 – 822 К; расход газа 69 – 113 кг/с.

Используемые расчетные модели. Принятые допущения. Фиксируемые параметры

Модель для расчета параметров цикла ГТУ. Используется модель, реализованная в одной из версий соответствующего программного комплекса кафедры СТ и ТУ СПбГМТУ [5]. В части учета влияния расхода охлаждающего воздуха на расчетные параметры цикла ГТУ в использованной модели приняты дополнительные допущения. Весь охлаждающий воздух отбирается за компрессором и направляется в газовую турбину с заданной потерей давления. Величина потери давления определяется в процессе балансировки модели по данным прототипа двигателя. Воздух дополнительно не охлаждается.

Модель для оценки необходимого расхода воздуха для охлаждения деталей ГТД. Используется модель СПбГМТУ [6], учитывающая влияние на величину относительного расхода охлаждающего воздуха конструкции системы охлаждения, температуры газа за камерой сгорания, температуры охлаждающего воздуха (степени повышения давления в цикле), допустимой температуры поверхности металла. Модель построена на основе обобщения опытных данных по охлаждению лопаточных венцов в зависимости от безразмерного параметра температурной интенсивности охлаждения. Конструктивная схема охлаждения выбирается автоматически в зависимости от полученных численных значений безразмерного параметра температурной интенсивности охлаждения. Для значений этого параметра больше 0,4 принята конвективно-пленочная схема, при меньших значениях – конвективная.

Модель для оценки предела длительной прочности материала в зависимости от температуры поверхности материала и заданной продолжительности эксплуатации (ресурса). Используется эмпирическая зависимость предела длительной прочности от параметра Ларсона–Миллера (*LMP*) для выбранного материала. Параметр Ларсона–Миллера (*LMP*) определяется следующим образом

$$LMP = T_m \cdot \left(Lg\, t + C\right)/1000 ,$$

где t - время (ресурс) в часах, $C = 20$ – константа, T_m – температура материала в К.

Во всех расчетах использовались опубликованные в открытых источниках свойства

отечественного материала для деталей морских ГТД ЧС88У [7, 8]. Экспериментальные данные ВИАМ из источника [7] обработаны и описаны линейной зависимостью

$$\sigma_{ДП} = 2703 - 91{,}456 \cdot LMP, \quad (1)$$

где $\sigma_{ДП}$ - предел длительной прочности материала.

Принятые фиксированные значения ряда параметров в расчетных исследованиях

А) Ресурс деталей горячей проточной части принят постоянным и равным 30000 часов.

Б) В качестве предельных допускаемых напряжений приняты значения напряжения предела длительной прочности <= 400 МПа без учета коэффициентов запаса.

В) Значения изоэнтропийных КПД турбомашин для морских ГТД мощностью около 30 МВт оценены по результатам балансировки используемой расчетной модели цикла ГТУ по параметрам близких прототипов и приведены в таблице 1.

Таблица 1

Принятые фиксированные значения КПД турбомашин

Турбомашина	КНД	КВД	ТВД	ТНД	СТ
Значение КПД	0,865	0,855	0,89	0,91	0,89

По нашему мнению, найденные значения КПД вполне достижимы для современного уровня развития теории и проектирования проточных частей. В процессе выполнения расчетных исследований эти значения условно не изменялись, что является определенным допущением.

Обоснование принятых значений варьируемых параметров

Температура поверхности материала. Расчетные исследования будут выполнены для нескольких значений температуры на поверхности материала лопаток турбины T_m = 750; 800; 850 $^\circ C$.

Допускаемая температура материала лопаток оказывает заметное влияние на необходимый расход воздуха на охлаждения деталей, а значит и КПД двигателя. С другой стороны, допускаемая температура материала в основном определяется доступными технологиями и жаропрочными свойствами сплавов. К возможным способам повышения температуры поверхности деталей и снижения расхода воздуха на охлаждение можно отнести следующие мероприятия.

1. Изменение состава жаропрочного сплава (возможности ограничены, имеются математические модели, позволяющие создавать сплавы с доступными свойствами и предсказывающие предельные значения свойств [9]).

2. Управление структурой сплавов (направленная кристаллизация, монокристаллическая структура). Возможности повышения жаропрочности также ограничены.

3 Применение композитных материалов с термобарьерными покрытиями [10, 11]. (Существуют проблемы обеспечения прочности соединения с основным материалом и самого термобарьерного покрытия).

При выборе диапазона варьирования температуры материала приняты следующие соображения:

А) Для принятого материала **ЧС88У** по экспериментальным данным (1) ресурс в **30000 ч** с пределом длительной прочности **400 МПа** может быть обеспечен при температуре на поверхности материала $T_m \le 750^\circ C$. Эти значения можно допускать для данного материала без применения специальных технологий изготовления. Большие значения температуры можно будет допускать только при изменении термопрочностных свойств материала или при применении термобарьерных покрытий.

Б) Температуру на поверхности материала T_m = **750 - 800** $^\circ C$ можно будет допустить при применении материала **ЧС88У** с многослойным термобарьерным покрытием. (Если принять допущение, что покрытие позволит снизить температуру материала на 50 $^\circ C$ [10]).

В) Температуру на поверхности материала T_m = **800 - 850** $^\circ C$ можно будет допустить при изменении термопрочностных свойств исходного материала и при применении эффективных термобарьерных покрытий. (При толщине многослойного покрытия до 150 мкм температура снижается до 100 $^\circ C$ [10, 11]).

Температура газа за камерой сгорания. Расчетные исследования выполняются для 4-х фиксированных значений температур газа за камерой сгорания T_3 =1365; 1465; 1530; 1590 К. Эти значения перекрывают диапазон температур T_3, характерных для морских ГТД 3, 4 и , частично, 5 поколения.

Степень повышения давления в цикле. Расчетные исследования выполняются для 7-ми фиксированных значений степени повышения давления в цикле ГТУ в диапазоне $\pi_к$ от 15 до 33. Данный диапазон перекрывает значения степени повышения давления, характерные для выполненных и проектируемых морских газотурбинных двигателей 3, 4 и 5 поколения.

Выбранные диапазоны изменения варьируемых параметров позволят установить рациональные значения параметров цикла морской ГТУ при наличии определенных материалов и технологий, в том числе применительно к современному российскому производству.

Результаты расчетных исследований параметров ГТД мощностью 30 МВт

Влияние температуры за КС (T_3) и степени повышения давления в цикле ($\pi_к$) на КПД цикла ГТУ и необходимый относительный расход охлаждающего воздуха для фиксированной температуры поверхности материла лопаток

T_m =**750, 800, 850**$^\circ C$ (ресурс 30000 ч., предел длительной прочности 400 МПа) показано на рисунках 1, 2, 3 соответственно.

Результаты расчетов демонстрируют сильное влияние допустимой температуры поверхности материала для деталей проточной части на оптимальные параметры цикла ГТУ. В результате расчетных исследований с учетом ограничений по свойствам материалов и технологий получен экстремальный характер зависимости КПД от степени повышения давления в цикле ($\pi_к$) и температуры газа за камерой сгорания (T_3). Эти результаты можно объяснить следующим образом. С увеличением степени повышения давления в цикле и температуры газа за камерой сгорания создаются предпосылки для увеличения термодинамического КПД цикла ГТУ. Однако одновременно увеличивается температура воздуха за компрессором, который используется для охлаждения деталей. Рост температуры охладителя и температуры газа за камерой сгорания приводит к увеличению необходимого расхода воздуха на охлаждение, что способствует снижению КПД цикла ГТУ. Поэтому с увеличением степени повышения давления и температуры за камерой сгорания на КПД цикла ГТУ оказывается противоположное влияние двух факторов. Этим объясняется экстремальный характер зависимости КПД от степени повышения давления в цикле ($\pi_к$) и температуры газа за камерой сгорания (T_3).

Результаты расчетных исследований для температуры материала лопаток 750$^\circ C$ представлены на рисунке 1.

Результаты показывают, что для принятой температуры поверхности материала T_m =750$^\circ C$ (см. рис.1) достижимый КПД цикла составляет около 0,38, оптимальная температура за КС T_3 ~1365 - 1465 К, оптимальное значение $\pi_к$ ~21 - 24 (мощность ГТД 30 МВт, материал – исходный сплав ЧС88У без покрытий, для T_3 =1365 К может применяться конвективная схема охлаждения до $\pi_к$ =21). Достигнутые оптимальные расчетные параметры для данной температуры материала соответствуют параметрам морских ГТД 3-го поколения и близки к таковым с учетом разницы мощностей, например, для морского ГТД LM2500.

Результаты расчетных исследований для температуры материала лопаток 800$^\circ C$ представлены на рисунке 2. Такую температуру на поверхности материала можно будет допустить при применении материала **ЧС88У** с многослойным термобарьерным покрытием.

Оптимальные значения температуры T_3 и $\pi_к$ изменяются в зависимости от допускаемой температуры поверхности материала T_m. Для температуры поверхности материала T_m =800$^\circ C$ (см. рис.2) достижимый КПД цикла составляет около 0,395, оптимальная температура за КС T_3 ~1465 - 1500 К, оптимальное значение $\pi_к$ ~24 - 26. На график нанесены известные параметры ГТД 4-го поколения GE LM2500+G4 (красный треугольник). Параметры этого двигателя практически совпадают с нашими расчетами для T_m =800$^\circ C$, температуре за КС около 1500 К и $\pi_к$ =24. Это подтверждает правильность сделанных предположений, достоверность моделей и результатов выполненных расчетов.

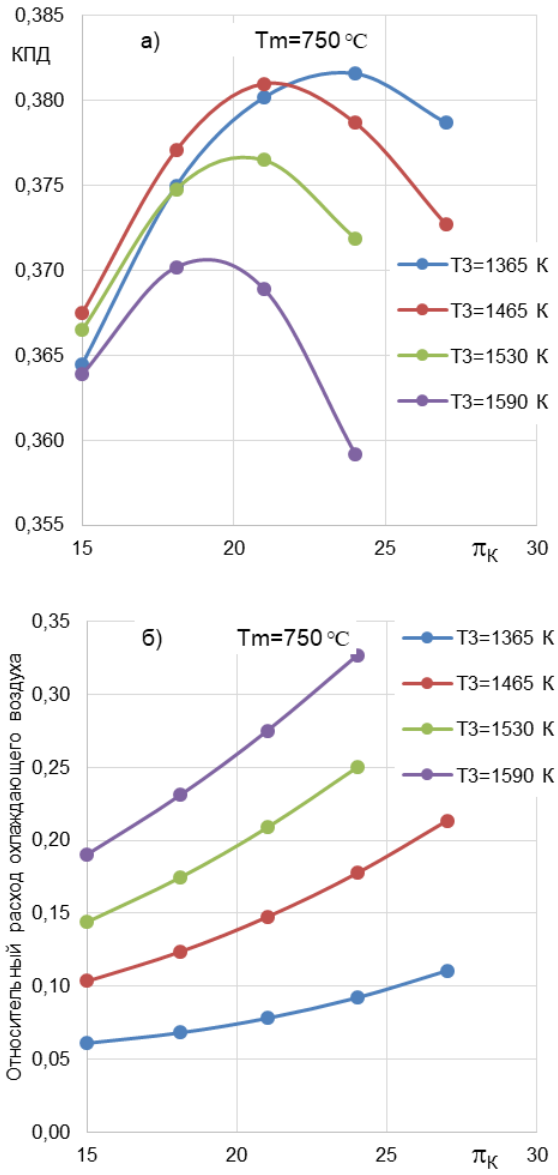


Рис. 1. Влияние температуры за КС (T_3) и степени повышения давления в цикле ($\pi_к$) при фиксированной температуры поверхности материла лопаток T_m =750$^\circ C$ на:
а) КПД цикла ГТУ;
б) необходимый относительный расход охлаждающего воздуха

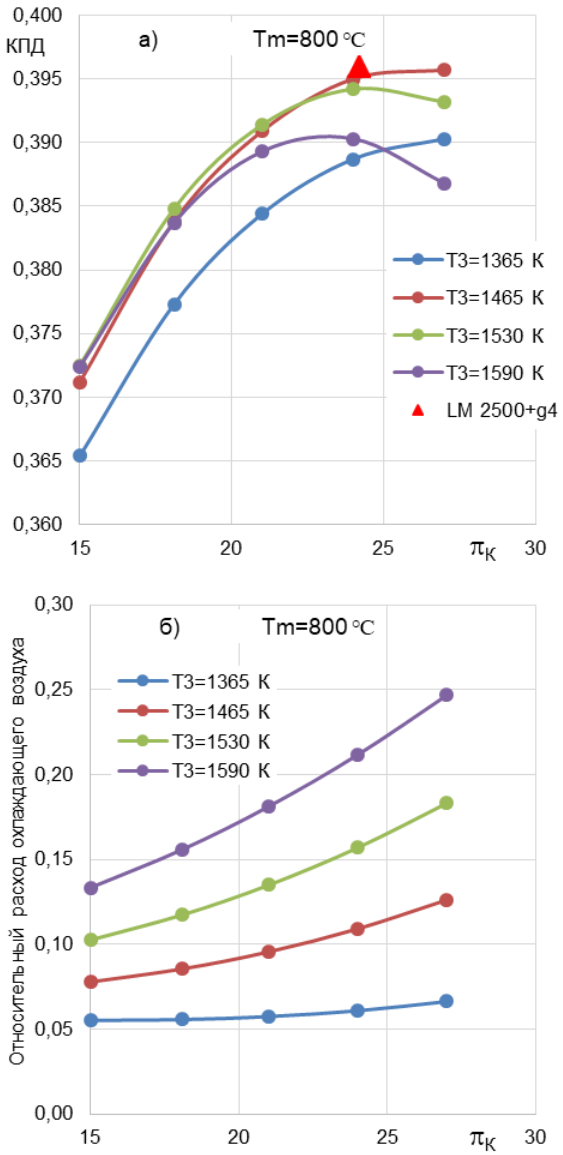


Рис. 2. Влияние температуры за КС (T_3) и степени повышения давления в цикле ($\pi_к$) при фиксированной температуры поверхности материла лопаток T_m =800 °C на:
а) КПД цикла ГТУ;
б) необходимый относительный расход охлаждающего воздуха

Результаты расчетных исследований для температуры материала лопаток 850 °C представлены на рисунке 3. Такую температуру на поверхности материала можно будет допустить при изменении термопрочностных свойств исходного материала ЧС88У и при применении эффективных термобарьерных покрытий применении. Для этой температуры поверхности металла достижимое КПД цикла может составить 0,405 - 0,408, оптимальные значения $\pi_К$ =27 - 30, оптимальные значения температуры за КС T_3 =1530 - 1590 К при этом, остается конкурентно-способной температура за камерой сгорания около 1490 К при $\pi_К$ =30. Указанные параметры близки к значениям таковых для двигателя фирмы RR MT 30, который некоторые исследователи относят к морским ГТД 5-го поколения.

С учетом результатов расчетов, представленных на рисунках 1-3 можно построить зависимости максимального расчетного значения КПД ГТД простого цикла от температур газа за камерой сгорания и допустимой температуры поверхности материала. Зависимость изображена на рисунке 4.

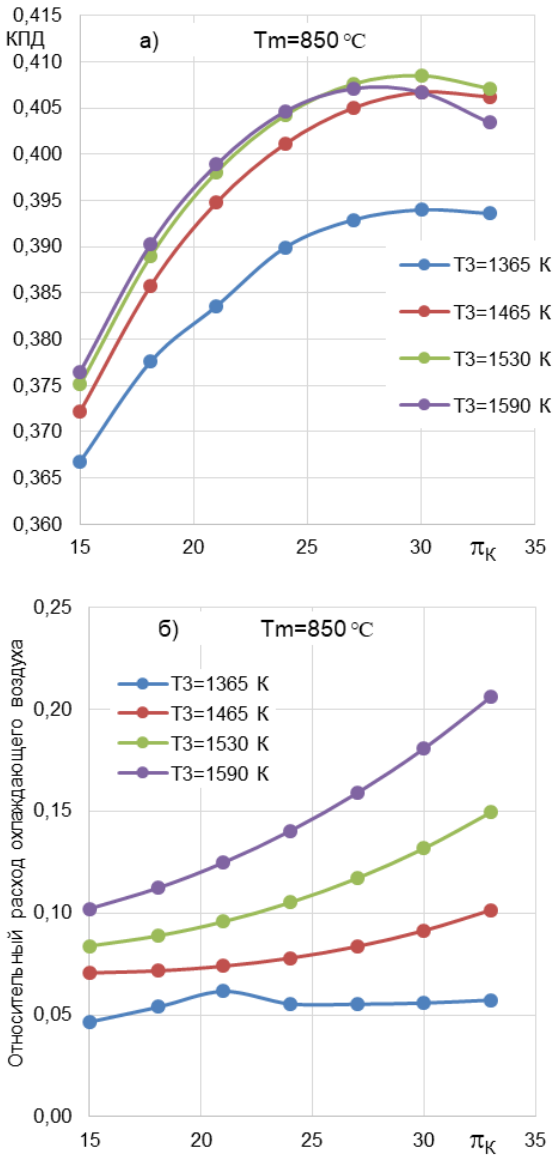


Рис. 3. Влияние температуры за КС (T_3) и степени повышения давления в цикле ($\pi_к$) при фиксированной температуры поверхности материла лопаток T_m =850 °C на:
а) КПД цикла ГТУ;
б) необходимый относительный расход охлаждающего воздуха

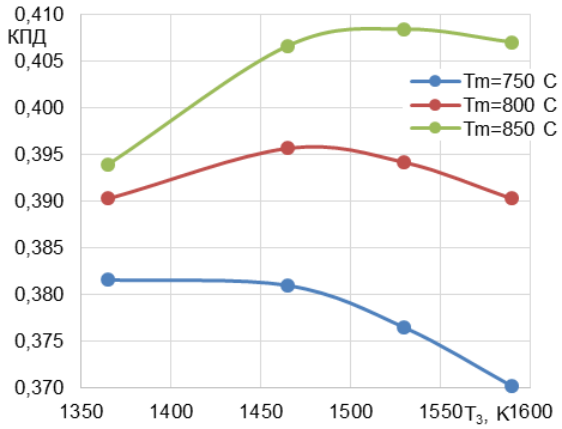


Рис. 4. Влияние температуры газа за камерой сгорания (T_3) и допустимой температуры поверхности лопаток (T_m) на расчетное значение максимально достижимого КПД морского ГТД простого цикла

Таким образом, результаты наших расчетных исследований подтвердили, что допустимая температура поверхности материала T_m определяет достижимое значение КПД ГТУ при конвективно-пленочной системе охлаждения, оптимальную температуру за камерой сгорания (T_3) и степень повышения давления в цикле ($\pi_к$). Однако следует учесть, что результаты оценки оптимального значения $\pi_к$ получены в предположении неизменности величин КПД турбомашин при изменении $\pi_к$. Это допущение приводит к некоторому завышению оптимальных значений $\pi_к$, так как с ростом $\pi_к$ КПД турбомашин должен уменьшаться в области больших значений степени повышения давления.

Полученные расчетные данные согласуются с данными статистики по выполненным морским ГТД основных производителей. На рисунке 5 показан график статистической зависимости КПД морских ГТД основных мировых производителей от мощности [12]. На графике нанесены точки, соответствующие максимальным КПД, полученным в наших проектных расчетах для температур поверхности материала деталей T_m =750, 800, 850 °C (Мощность ГТД 30МВт, принятый ресурс 30000 ч, допускаемые напряжения длительной прочности без учета коэффициентов запаса 400 МПа).

Полученные результаты хорошо согласуются с данными статистики по выполненным морским ГТД 3-5-го поколения основных мировых производителей. Данные позволяют предположить, какие требования к материалам и технологиям следует предъявлять для достижения соответствующих показателей морского ГТД.

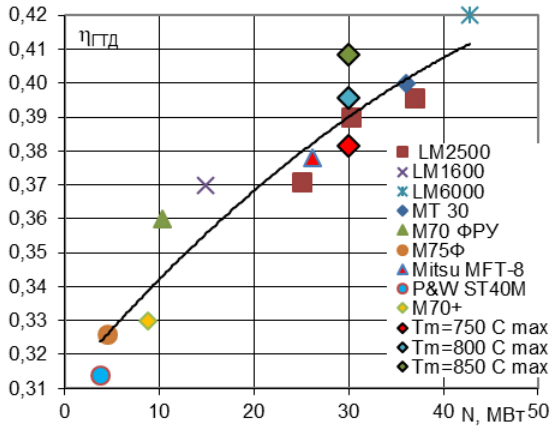


Рис. 5. Статистическая зависимость КПД морских ГТД основных мировых производителей от мощности [12] с нанесенными точками, соответствующими вариантам ГТД с максимальным КПД, полученным в наших проектных расчетах для температур поверхности материала деталей T_m =750, 800, 850 °C

Выводы

1. Выполненное на уровне концептуального проектирования расчетное исследование влияния параметров цикла на экономичность морских газотурбинных двигателей простого цикла мощностью 30 МВт, с учетом принятого ресурса, наглядно продемонстрировало сильное влияние допустимого значения температуры поверхности материала, которое определяется свойствами материала лопаток и технологиями изготовления, на оптимальные значения параметров цикла ГТУ. Достоверность полученных результатов подтверждена сравнением с известными параметрами морских ГТД ведущих мировых производителей. Анализ результатов исследования позволяет сформулировать основные требования к параметрам цикла ГТУ, параметрам ее элементов и технологиям для получения характеристик морского ГТД пятого поколения.

2. Для создания российского морского ГТД 5-го поколения мощностью около 30 МВт необходима разработка двухкаскадного компрессора с изоэнтропийным КПД около 0,86 - 0,865 и степенью повышения давления $\pi_к$=24 - 30 (создание однокаскадного компрессора с такими показателями более проблематично на примере мировых производителей). В этом случае можно ограничиться освоенной температурой 1530К, но потребуется обеспечить температуру на поверхности лопаток T_m =850 °C, например, за счет освоенных термобарьерных покрытий для уже известных материалов морских ГТД с ресурсом 30000 ч и конвективно-пленочной схемой охлаждения. Требуемый изоэнтропийный КПД по полным параметрам охлаждаемых турбин газогенератора (ТВД 0,89; ТНД 0,91) тоже представляется вполне реально достижимым. В этом случае КПД ГТД по ISO может составить более 0,4 - 0,405.

Литература

1. https://www.ge.com
2. https://www.forecastinternational.com/ Rolls-Royce MT30. Archived Report 5/2003.
3. Тихомиров Б.А., Зо Вин Тхайк: База данных современных морских газотурбинных двигателей /Тихомиров Б.А, Зо Вин Тхайк // Журнал «Морские интеллектуальные технологии». 2010. № 4. С. 23-29.
4. Барановский В.В. Тенденции развития энергетических установок многоцелевых надводных кораблей отечественного и зарубежных флотов.ч.1// Газотурбинные технологии. 2021. №3, с.34-41
5. Погодин Ю.М., Тихомиров Б.А. Модель и программный комплекс комбинированной газотурбинной установки. //Материалы XLII научно-технической сессии по проблемам газовых турбин РАН, Москва, 1995. с 73-74.
6. Погодин Ю.М., Ерохин С.К., Тимофеев Д.Д. Оценка необходимого относительного расхода воздуха на охлаждение деталей проточной части турбины на ранних стадиях проектирования газотурбинной установки. // Труды СПбГМТУ 2024, №3 с. 42-49.
7. Монастырская Е.В., Морозова Г.И., Власов Ю.Б. Структура, фазовый состав и свойства коррозионностойкого жаропрочного сплава ЧС88У. // Металловедение и термическая обработка металлов, 2006, №8. (ВИАМ).
8. Буров М.Н. Основные проблемы применения конвертированных газотурбинных двигателей в составе морских энергетических установок и их решение. // Вестник УГАТУ, 2018, т 22, №4, с 62-69.
9. Гецов Л.Б Материалы и прочность деталей газовых турбин. - М. Изд-во «Недра», 1996. -591 с.
10. Медников А.Ф., Медведев К.С., Качалин Г.В. и др. Обзор современных способов формирования термобарьерных покрытий // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 4. С. 132–148. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.29409
11. Теплозащитные покрытия лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей / В.П. Панков, А.Л. Бабаян, М.В. Куликов и др. // Ползуновский вестник. 2021. № 1.С. 161–172. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.023/
12. Погодин Ю.М., Безухов А.П. Оценка внешних параметров поршневых и газотурбинных двигателей на ранних стадиях проектирования морской энергетической установки. //Судостроение. 2024. №4, с.60-66.

References

1. https://www.ge.com
2. https://www.forecastinternational.com/ Rolls-Royce MT30. Archived Report 5/2003.
3. Tikhomirov B.A., Zo Win Thaik: Database of modern marine gas turbine engines // Journal "Marine Intellectual Technologies". 2010. No. 4, pp. 23-29
4. Baranovsky V.V. Tendencies of development of power installations of multi-purpose surface ships of domestic and foreign fleets. Parts 1// Gas-turbine technologies. 2021. No.3, pp.34-41.
5. Pogodin Yu.M., Tikhomirov B.A. Model and software package for a combined gas turbine unit. // Proceedings of the XLII scientific and technical session on gas turbine problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 1995. pp. 73-74.
6. Pogodin Yu.M., Erokhin S.K., Timofeev D.D. Estimation of the required relative air flow rate for cooling the parts of the turbine flow path at the early stages of gas turbine unit design. // Proceedings of SPbGMTU 2024, No. 3, pp. 42-49.
7. Monastyrskaya E.V., Morozova G.I., Vlasov Yu.B. Structure, phase composition and properties of corrosion-resistant heat-resistant alloy ЧС88У. // Metallurgy and heat treatment of metals, 2006, No. 8. (VIAM).
8. Burov M.N. The main problems of using converted gas turbine engines in marine power plants and their solution.// UGATU Bulletin, 2018, Vol. 22, No. 4, pp. 62-69.
9. Getsov L.B. Materials and strength of gas turbine parts. - M. Publishing house "Nedra", 1996.-591 p.
10. Mednikov A.F., Medvedev K.S., Kachalin G.V., et al. Review of modern methods for forming thermal barrier coatings // Global Energy. 2023. Vol. 29, No. 4. Pp. 132–148. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.29409
11. Thermal protection coatings for turbine blades of aircraft gas turbine engines / V.P. Pankov, A.L. Babayan, M.V. Kulikov, et al. // Polzunovsky Bulletin. 2021. No. 1. pp. 161-172. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.023/
12. Pogodin Yu.M., Bezukhov A.P. Preliminary estimate of external properties of pistons engines and gas turbines engines for early phases design of marine power plant//Shipbuilding. 2024. №4, pp.60-66.

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

Погодин Юрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовых турбин и турбинных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: yu_pogodin@mail.ru.

Смирнов Александр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовых турбин и турбинных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: smir70@mail.ru.

Безухов Андрей Павлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовых турбин и турбинных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: bezukhov@mail.ru.

Сандовский Александр Андреевич, магистрант 2-го года, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: sasha.sandovskiy@mail.ru.

Yuriy M. Pogodin, PhD. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Ship Turbines and Turbine Units, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: yu_pogodin@mail.ru.

Alexander A. Smirnov, PhD. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Ship Turbines and Turbine Units, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: smir70@mail.ru.

Andrey P. Bezukhov, PhD. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Ship Turbines and Turbine Units, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: bezukhov@mail.ru.

Alexander A. Sandovsky, 2 year master's student, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: sasha.sandovskiy@mail.ru.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 16.06.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 02.07.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 04.07.2026.

Научная статья
УДК 621.039.58
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.043

Стенд инжекторной системы аварийного расхолаживания с автозапуском через промежуточную емкость

Белова С.С.[1] sofya.gonyaeva@yandex.ru, **Кожемякин В.В.**[1] kogh2022@mail.ru,
Морозов Н.А.[1] nikita.morozov99@mail.ru, **Романов А.И.**[1] frozenpear@mail.ru, **Шаманов Д.Н.**[1] shim@smtu.ru
[1]Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Работа посвящена экспериментальному стенду инжекторной системы аварийного расхолаживания. Система должна обеспечивать штатное и аварийное расхолаживание ядерной энергетической установки, без использования оборудования, обслуживающего второй контур. В виду этого было предложено использовать систему с забортным теплообменным аппаратом, отводящим остаточное тепловыделение забортной воде, и пароводяными струйными аппаратами, созданными для интегрального реактора «Бета», в качестве циркуляционных средств. Эксперименты подтвердили работоспособность инжекторной системы аварийного расхолаживания, однако для запуска пароводяного струйного аппарата, через него необходимо обеспечить расход воды и пара. В инжекторных системах этот расход создается за счет перепада давления в емкостях. Однако исследования выявили ряд недостатков изучаемых схем. Поэтому была предложена и обоснована схема инжекторной системы аварийного расхолаживания с промежуточной емкостью. Принцип ее действия основан на том, что вода под действием естественной циркуляции вытесняется из промежуточной емкости в парогенератор, создавая условия для запуска пароводяного струйного аппарата. Установив пароводяной струйный аппарат таким образом, чтобы его рабочее сопло находилось на границе раздела фаз «пар-вода», пар начнет автоматически поступать в проточную часть аппарата, обеспечивая его запуск. Для проверки работоспособности и характеристик этой схемы создан экспериментальный стенд. Выполнены пуско-наладочные испытания стенда, дающие основу для дальнейших экспериментальных исследований и подтверждения работоспособности предложенной схемы для систем аварийного расхолаживания ядерных энергетических установок.
Ключевые слова: забортный теплообменный аппарат, пароводяная смесь, пароводяной струйный аппарат, парогенератор, промежуточная емкость, стенд, система аварийного расхолаживания, ядерная энергетическая установка
Для цитирования: Белова С.С., Кожемякин В.В., Морозов Н.А., Романов А.И., Шаманов Д.Н. Стенд инжекторной системы аварийного расхолаживания с автозапуском через промежуточную емкость, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 162—167. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.043

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.043

Stand for an emergency cooldown injector system with autostart via an intermediate tank

Sofya S. Belova[1] sofya.gonyaeva@yandex.ru, **Vyacheslav V. Kozhemyakin**[1] kogh2012@yandex.ru,
Nikita A. Morozov[1] nikita.morozov99@mail.ru, **Alexander I. Romanov**[1] frozenpear@mail.ru,
Dmitriy N. Shamanov[1] shim@smtu.ru
[1]St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The work is devoted to an experimental test bench for an injector emergency cooldown system. The system must be capable of providing normal and emergency cooldown of the nuclear power plant without using equipment serving the secondary circuit. In view of this, it was proposed to use a system with an outboard heat exchanger, which removes residual heat to the outboard water, and steam-water jet apparatuses developed for the «Beta» integral reactor as circulation means. Experiments confirmed the operability of the injector emergency cooldown system; however, to start up a steam-water jet apparatus, a flow of water and steam must be ensured through it. In injector systems, this flow is generated by the pressure differential between the vessels. However, the studies revealed a number of shortcomings in the schemes under investigation. Therefore, a configuration of an injector emergency cooldown system with an intermediate tank was proposed and justified. Its principle is based on the fact that water, under the action of natural circulation, is displaced from the intermediate tank into the steam generator, creating conditions for starting up the jet apparatus. By installing the steam-water jet apparatus in such a way that its working nozzle is located at the steam-water phase interface, steam will automatically begin to flow into the flow path of the apparatus, ensuring its startup. An experimental test bench was created to verify the operability and characteristics of this configuration. Commissioning tests of the test bench have been performed, providing the basis for further experimental research and confirmation of the proposed configuration's operability for emergency cooldown systems of nuclear power plants.
Keywords: external heat exchanger, steam-water mixture, steam-water jet apparatus, steam generator, intermediate tank, stand, emergency core cooling system, nuclear power plant

© Белова С.С., Кожемякин В.В., Морозов Н.А., Романов А.И., Шаманов Д.Н. 2026

For citation: Sofya S. Belova, Vyacheslav V. Kozhemyakin, Nikita A. Morozov, Alexander I. Romanov, Dmitriy N. Shamanov, Stand for an emergency cooldown injector system with autostart via an intermediate tank, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 162—167. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.043

Введение

Одним из видов пассивных систем расхолаживания являются инжекторные системы аварийного расхолаживания (ИСАР), в которых циркуляция теплоносителя осуществляется пароводяными струйными аппаратами (ПВСА). ПВСА позволяет преобразовать часть теплоты остаточного тепловыделения в гидравлический напор. Это дает возможность отводить остаточное тепловыделение от ядерной энергетической установки через забортный теплообменный аппарат (ЗТО) к забортной воде.

В качестве циркуляционного средства в ИСАР целесообразно использовать ПВСА, созданный для интегрального реактора «Бета» [1-6].

Эксперименты подтвердили работоспособность ИСАР – ПВСА самостоятельно запускаются при пуске системы и перезапускаются после срыва [7, 8]. Расчетно-теоретические исследования позволили решить ряд задач, связанных с обеспечением динамической устойчивости и согласованием баланса мощностей (подводимой в парогенераторе, отводимой в ЗТО и передаваемой ПВСА) [9-11].

Для запуска ПВСА, т.е. для того, чтобы он перестал быть гидравлическим сопротивлением и начал работать как насос, через него необходимо обеспечить расход воды и пара. В ИСАР этот расход создается за счет перепада давления в емкостях.

Однако выполненные исследования выявили ряд недостатков изучаемых схем ИСАР. Поэтому была предложена и обоснована схема ИСАР с промежуточной емкостью. Для проверки работоспособности и характеристик этой схемы был создан экспериментальный стенд.

1. Схема стенда

На рисунке 1 представлена схема стенда ИСАР, в состав которой входят следующие основные элементы.

Парогенератор электродного типа, имитирующий парогенератор ядерной энергетической установки. В нем нагрев происходит за счет пропускания переменного электрического тока через электропроводную среду. Пар, выработанный в парогенераторе, поступает в ПВСА через электромагнитный клапан управления.

Пароводяной струйный аппарат, обеспечивающий циркуляцию теплоносителя в системе.

Промежуточная емкость, которая предназначена для обеспечения автоматического запуска струйного аппарата. Пар под действием естественной циркуляции вытесняет теплоноситель из промежуточной емкости в компенсатор объема, освобождая пространство для пара и формируя четкую границу раздела фаз «пар-вода». Если установить ПВСА таким образом, чтобы его рабочее сопло находилось на этой границе, пар начнет автоматически поступать в проточную часть струйного аппарата, обеспечив его запуск.

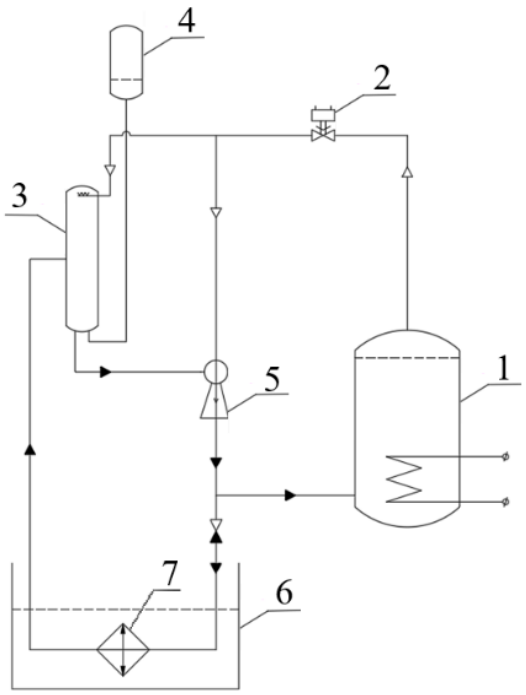


Рис. 1 Принципиальная схема стенда.
1 – парогенератор; 2 – электромагнитный клапан управления; 3 – промежуточная емкость;
4 – компенсатор объёма; 5 – пароводяной струйный аппарат; 6 – бак «море»; 7 – змеевиковый теплообменник

Система охлаждения – бак «море». Представляет собой алюминиевую емкость, заполненную водой, объем которой контролируется тремя поплавковыми уровнемерами. Внутри бака расположен змеевиковый теплообменник (4 витка медной трубы диаметром 14 мм), через который проходит охлаждаемый теплоноситель.

2. Стенд инжекторной системы аварийного расхолаживания с автозапуском через промежуточную емкость

На рисунке 2 представлен опытно-экспериментальный стенд инжекторной системы аварийного расхолаживания с автозапуском через промежуточную емкость.

Основной целью стенда является обоснование работоспособности различных схем систем аварийного расхолаживания с ПВСА и решение проблем, связанных с работой ИСАР, в частности, задач автоматического запуска и перезапуска пароводяного струйного аппарата.

Экспериментальная установка позволяет проводить исследования и получать результаты испытаний, обеспечивать многократные перезапуски системы, а также изучать особенности её функционирования и способы повышения эффективности рабочего процесса.

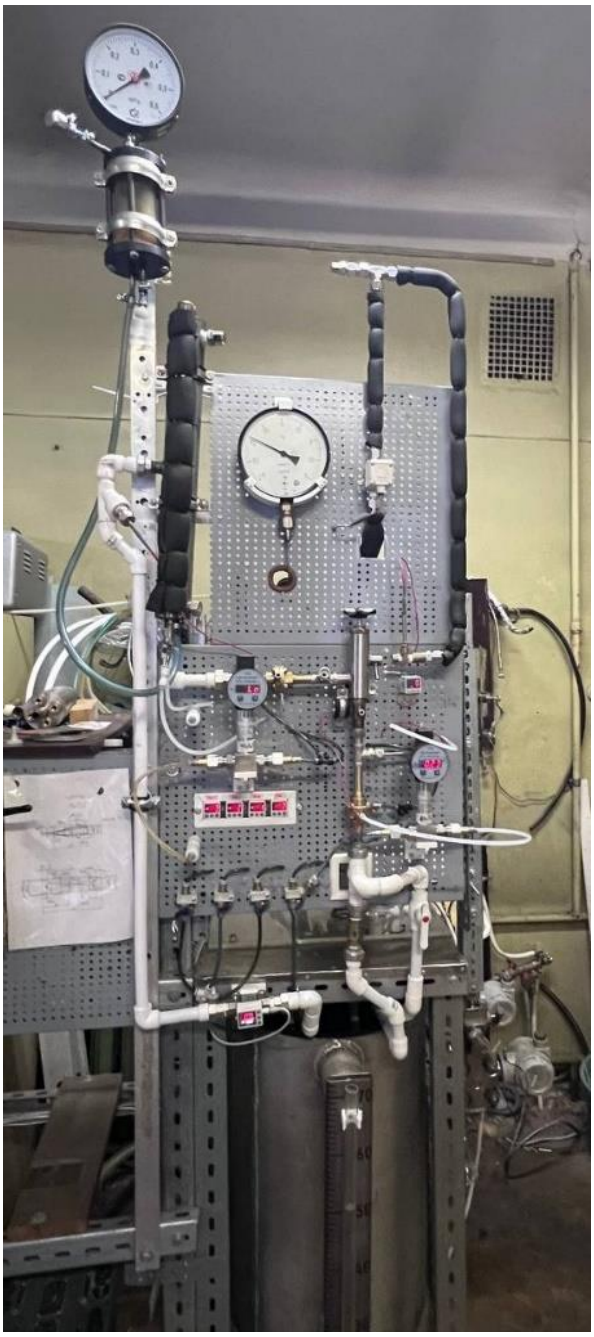


Рис. 2 Опытно-экспериментальный стенд для исследования инжекторной системы аварийного расхолаживания с автозапуском через промежуточную емкость

3. Пароводяной струйный аппарат

Ключевым элементом стенда является пароводяной струйный аппарат, представленный на рисунке 3. ПВСА, состоит из следующих основных устройств.

Рабочее сопло – коническое внутри и снаружи устройство, изготовленное из латуни. Предназначено для преобразования потенциальной энергии пара в кинетическую.

Камера смешения – состоит из конфузора, цилиндрической части и диффузора, также изготовлена из латуни. Служит зоной для смешения рабочей и эжектируемой среды и конденсации пара.

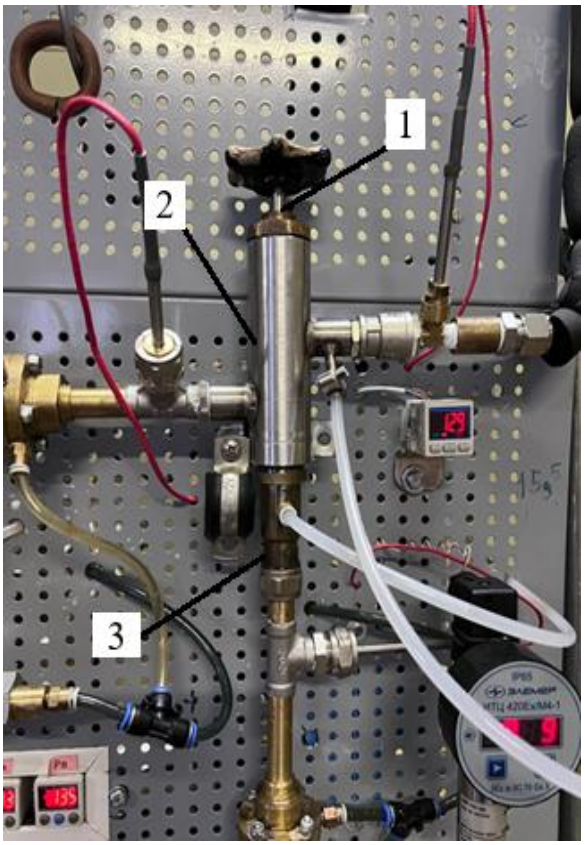


Рис. 3 Пароводяной струйный аппарат. 1 – каретка перемещения; 2 – корпус струйного аппарата; 3 – камера смешения

Каретка перемещения. Элемент, предназначенный для фиксации рабочего сопла, обеспечения его соосного расположения внутри камеры смешения и перемещения сопла относительно камеры смешения.

Принцип работы ПВСА основан на использовании теплоты остаточного тепловыделения. В конфузоре происходит смешение пара и воды и разгон двухфазного неравновесного потока.

В некотором сечение камеры смешения устанавливается скачок конденсации, в котором происходит конденсация пара. В диффузоре однофазный водяной поток тормозится с соответствующим повышением давления.

ПВСА может создавать давление на выходе, превышающее давление пара и воды на входе. То есть он может работать как насос, что дает возможность использовать ПВСА в качестве циркуляционного средства в замкнутом контуре.

4. Принцип работы стенда

Перед началом эксперимента осуществляется включение системы нагрева парогенератора. При достижении параметров насыщения открывается электромагнитный клапан, и пар из парогенератора начинает поступать в промежуточную емкость. Из-за разности уровней начинается движение воды из промежуточной емкости в парогенератор, что создает необходимые условия для запуска ПВСА.

В дальнейшем ПВСА обеспечивает циркуляцию теплоносителя в системе. Часть теплоносителя циркулирует в контуре: диффузор ПВСА – парогенератор – паровое сопло ПВСА. Основная

часть теплоносителя циркулирует в контуре: диффузор ПВСА – змеевиковый теплообменник – промежуточная емкость – водяное сопло ПВСА.

Функционирование системы продолжается до момента прекращения парообразования в парогенераторе.

5. Контрольно-измерительные приборы

Для контроля параметров стенда в нем установлен ряд приборов (рисунок 4).

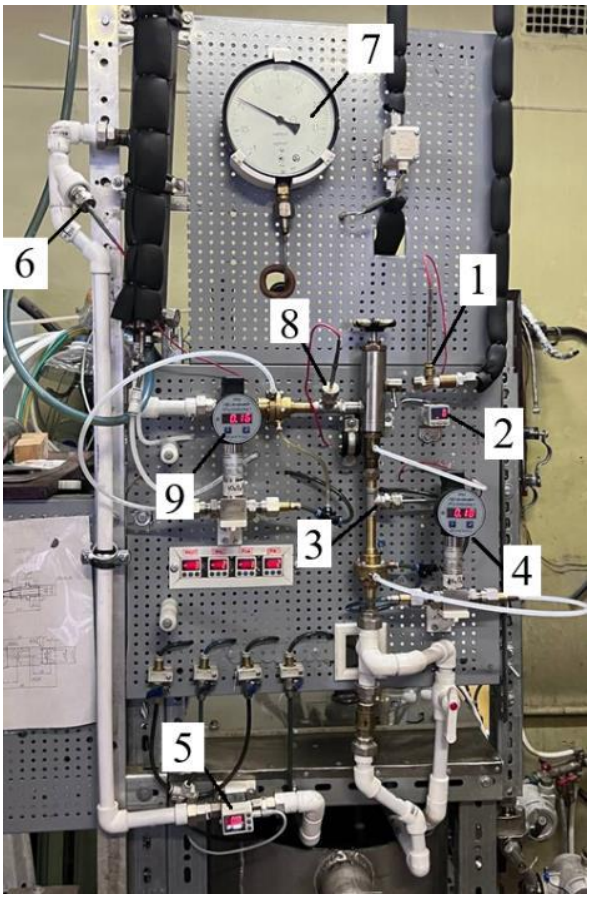


Рис. 4 Контрольно-измерительные приборы стенда. 1 – термопара (температура пара на входе в ПВСА); 2 – манометр (давление пара на входе в ПВСА); 3 – термопара (температура воды на выходе из ПВСА); 4 – дифманометр (давление и расход воды на выходе из ПВСА); 5 – расходомер (расход воды из бака «море»); 6 – термопара (температура смеси на входе в промежуточную емкость); 7 – манометр (давление в парогенераторе); 8 – термопара (температура воды на входе в ПВСА); 9 – дифманометр (давление и расход воды на входе в ПВСА)

Сигналы от датчиков поступают на модули вторичного преобразования, установленные в контроллеры распределенной системы ADAM 5000 TCP (рисунок 5).

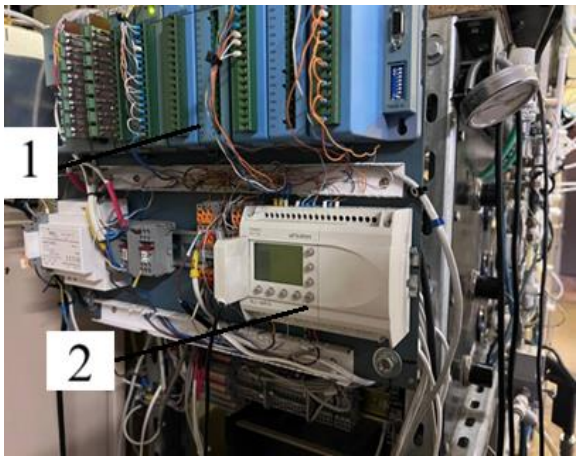


Рис. 5 Система сбора информации стенда 1 – модули вторичного преобразования; 2 – контроллер распределенной системы ADAM 5000 TCP

Контроллеры оцифровывают сигналы и по Ethernet передают их в SCADA-систему VUVX (разработка СПбГМТУ). Опрос датчиков производится один раз в секунду. Данные записываются в электронный журнал испытаний для последующей обработки.

6. Пуско-наладочные испытания

Перед запуском стенда выполнена проверка герметичности системы. В контуре было создано избыточное давление 2,5 атм. Система была признана готовой к испытаниям.

Проведенный комплекс пуско-наладочных испытаний подтвердил работоспособность системы.

При достижении параметров насыщения в парогенераторе пар начал поступать в промежуточную емкость, и произошел запуск ПВСА. В дальнейшем была зафиксирована устойчивая работа ПВСА.

Для имитации режима расхолаживания парогенератор был отключен от сети. Система обеспечила расхолаживание до полного прекращения парообразования в парогенераторе.

Заключение

Предложена и обоснована схема ИСАР с промежуточной емкостью. Для подтверждения работоспособности и исследования характеристик такой ИСАР создан экспериментальный стенд.

Выполнены пуско-наладочные испытания, в которых зафиксированы автоматический запуск и устойчивая работа ПВСА вплоть до полного прекращения парообразования в парогенераторе.

Разработанный стенд создаёт основу для дальнейших экспериментальных исследований, установления границ работоспособности предложенной инжекторной схемы для систем аварийного расхолаживания ядерных энергетических установок.

Литература

1. Рыльцов Н.А., Саловатов Е.Х., Шаманов Н.П. Струйный насос: пат. 2116522 / Заявитель и Патентообладатель СПбГМТУ; заявл. 22.10.1996; опуб. 27.07.1998. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам Российской Федерации, 1996;
2. Шаманов Н.П., Дядик А.Н., Лабинский А.Ю. Двухфазные струйные аппараты. – Л.: Судостроение, 1989.

3. Кожемякин В.В., Кожемякин В.О., Шаманов Н.П. Расчетно-теоретическое исследование статических характеристик ядерного моноблочного паропроизводящего агрегата типа «Бета»: режимы без отключения пароводяных струйных аппаратов. Морской вестник, 2014, №1 (49), с. 51-54.
4. Игнатьева Е.С., Кожемякин В.В. Расчетно-теоретическое исследование работы пароводяного струйного аппарата при дополнительном подводе воды в камеру смешения. Морские интеллектуальные технологии, 2019, №4 (46) т. 1, с. 148-152.
5. Шаманов Н.П., Шаманов Д.Н., Кожемякин В.В. , Соломянский В.Б, Алексеенко И.М.Полунатурный стенд для экспериментальных исследований судового ядерного моноблочного паропроизводящего агрегата «Бета» // Морской Вестник. 2011, № 2(38), с. 47-48.
6. Шаманов Н.П., Шаманов Д.Н., Кожемякин В.В. , Соломянский В.Б, Андреев А.Г., Коршунов А.И Экспериментальные исследования на полунатурном стенде судового ядерного моноблочного паропроизводящего агрегата «Бета-К» на приморской учебно-научной базе СПбГМТУ // Морской Вестник. 2012, № 2(42), с. 29-31.
7. Аполлова А.В, Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Шаманов Н.Л. Экспериментальные исследования системы пассивного отвода тепла на Приморской учебно-научной базе СПбГМТУ // Морские интеллектуальные технологии. 2018, №4 (42) т. 1, с. 115-123..
8. Аполлова А.В, Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Тихомиров Б.А., Русаков Е.С. Экспериментальные исследование систем пассивного отвода тепла с ПВСА для реакторных установок // Морские интеллектуальные технологии 2019. № 4 (46) . 1, с. 123-129.
9. Аполлова А.В, Гайсина А.О., Кожемякин В.В. Квазистатические характеристики системы пассивного отвода тепла. // Морские интеллектуальные технологии. 2019, №1 (43) т. , с. 115-121
10. Аполлова А.В., Шаманов Д.Н., Русаков Е.С.Кожемякин В.В Анализ работоспособности двух систем пассивного отвода тепла со струйными аппаратами для реакторных установок // Морские интеллектуальные технологии 2020. № 4 (50) т. 3, с. 134-139.
11. С. С. Гоняева, В. В. Кожемякин, В. О. Кожемякин, Н.А. Морозов, А.С. Николаева, А.В. Аполлова Система аварийного расхолаживания // Морские интеллектуальные технологии. 2024, № 1 (63) т.1, с. 105-109.

References

1. Ryl`tsov N.A., Salovatov E.Kh., Shamanov N.P. Strujnyj nasos [Jet pump]. Patent RU 2116522 C1. Applicant and patent holder SPBSMTU; filed 22.10.1996; published 27.071.1998. Federal service for Intellectual property, patents and trademarks of the Russian Federation, 1996.
2. Shamanov N.P., Dyadik A.N., Labinsky A.Yu. Dvuhfaznye strujnye apparaty [Two-phase jet devices]. Leningrad: Shipbuilding, 1989.
3. Kozhemyakin V.V., Kozhemyakin V.O., Shamanov N.P. Raschetno-teoreticheskoe issledovanie staticheskih harakteristic yadernogo monoblochnogo paroproizvodjashhego agregata tipa «Beta»: rezhimy bez otklyucheniya parovodyanyh strujnyh apparatov [Calculation-theoretical study of the static characteristics of a nuclear mono block steam-producing unit of the "Beta" type: modes without shutting off the steam-water jet apparatus]. Morskoj vestnik, 2014, №1 (49), s. 51-54.
4. Ignat'eva E.S., Kozhemyakin V.V. Raschetno-teoreticheskoe issledovanie raboty parovodyanogo strujnogo apparata pri dopolnitel'nom podvode vody v kameru smesheniya [Calculation and theoretical study of the operation of a steam-water jet apparatus with an additional supply of water to the mixing chamber]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2019, №4 (46) t. 1, s. 148-152.
5. Shamanov N.P., Kozhemyakin V.V., Shamanov D.N., Solomyansky V.B., Alekseenko I.M. Polunaturnyj stend dlja eksperimental`nyh issledovanij sudovogo yadernogo monoblochnogo paroproizvodjashhego agregata «Beta» [Semi-natural stand at the Maritime Training-Scientific Base of the SPbSMTU for experimental studies of ship`s nuclear mono block steam generating unit «Beta»]. Morskoy Vestnik. 2011, № 2(38), s. 47-48.
6. Shamanov N.P., Kozhemyakin V.V., Shamanov D.N., Solomyansky V.B., Andreev A.G. Eksperimental`nye issledovaniya na polunaturnom stende sudovogo yadernogo monoblochnogo paroproizvodyashchego agregata «Beta-K» na primorskoy uchebno-nauchnoy baze SPbGMTU [Experimental studies on seminatural stand of marine nuclear monoblock steam-generating unit «Beta-K» at the primorskaya training and research base of the SPbSMTU]. Morskoy Vestnik. 2012, № 2(42), s. 29-31.
7. Apollova A.V., Kozhemyakin V.V., Shamanov D.N., Shamanov N.P. Eksperimental'nye issledovaniya sistemy passivnogo otvoda tepla na Primorskoy uchebno-nauchnoy baze SPbGMTU [Experimental studies of the passive heat removal system at the Primorsk educational and scientific base of St. Petersburg State Marine Technical University (SPBSMTU)]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018, № 4 (42) t. 1, s. 115 – 123.
8. Apollova A.V., Kozhemyakin V.V., Shamanov D.N., Tikhomirov B.A., Rusakov E.S. Eksperimental'noe issledovanie sistem passivnogo otvoda tepla s PVSA dlya reaktornykh ustanovok [Experimental investigations of the passive heat removal systems for reactor installations]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019, № 4 (46) t.1, s. 123 – 129.
9. Apollova A.V., Gajsina A.O., Kozhemyakin V.V. Kvazistaticheskie harakteristiki sistemy passivnogo otvoda tepla [Quasi-static characteristics of the passive heat removal system]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2019, №1 (43) t. 3, s. 115-121.
10. Apollova A.V., Rusakov E.S., Shamanov D.N., Kozhemyakin V.V. Perfomance analysis of two passive heat removal systems with jet devices for reactor installations. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020, № 4 (50) t.3, s. 134 – 139.

11. Gonyaeva S.S., Kozhemyakin V.V., Kozhemyakin V.O., Morozov N.A., Nikolaeva A.S., Apollova A.V. Sistema avarijnogo raskholazhivaniya [Emergency core cooling system]. Morskie intellektual'nye tekhнологии [Marine Intelligent Technologies], 2024, № 1 (63) t.1, s. 105-109.

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

Белова Софья Сергеевна, аспирант, старший преподаватель кафедры ядерной техники и теплофизики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: sofya.gonyaeva@yandex.ru

Sofya S. Belova, graduate student, Senior Lecturer of the Department of Nuclear Technology and Thermal Physics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: sofya.gonyaeva@yandex.ru,

Кожемякин Вячеслав Вячеславович, доктор технических наук, доцент кафедры ядерной техники и теплофизики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kogh2022@mail.ru

Vyacheslav V. Kozhemyakin, Dr. Sci. (Eng), assistant professor of the Department of Nuclear Technology and Thermal Physics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kogh2012@yandex.ru

Морозов Никита Александрович, аспирант, старший преподаватель кафедры ядерной техники и теплофизики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: nikita.morizov99@mail.ru

Nikita A. Morozov, graduate student, Senior Lecturer of the Department of Nuclear Technology and Thermal Physics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: nikita.morizov99@mail.ru

Романов Александр Игоревич, студент кафедры ядерной техники и теплофизики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: frozenpear@mail.ru

Alexander I. Romanov, Student group 2163, Department of Nuclear Technology and Thermal Physics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: frozenpear@mail.ru

Шаманов Дмитрий Николаевич, заведующий научно-исследовательского сектора ядерной техники и теплофизики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: shim@smtu.ru

Dmitriy N. Shamanov, Head of the Research Sector of the Nuclear Technology and Thermal Physics, Saint Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St., Saint Petersburg, 190121, e-mail: shim@smtu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 08.07.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.07.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 22.07.2026.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Научная статья
УДК 621.43.074
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.044

Мониторинг морской обстановки по маршруту «Усть-Луга – Балтийск» с применением отечественных космических систем дистанционного зондирования Земли

Говорухин В.П.[1] vgovoruhin@iptran.ru, **Родионов В.А**[2]. var1959@mail.ru, **Калинов М.И.**[2] cesavo@mail.ru, **Ильина Н.Н.**[1] innmail@mail.ru
[1]Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, [2]Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук

Аннотация. В настоящее время развитие экономики Калининградской области в значительной степени связано с морскими грузоперевозками. В статье проанализирована значимость морской паромной линии «Усть-Луга – Балтийск» для обеспечения безопасности и транспортной связанности Калининградской области с остальной территорией Российской Федерации, особенно в условиях санкционных ограничений со стороны недружественных стран. Для обеспечения безопасности судовождения необходим мониторинг морской обстановки по маршруту «Усть-Луга – Балтийск», который может быть осуществлен с применением отечественных космических систем, включая космические аппараты (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (КА «Ресурс-П», КА «Кондор-ФКА» и КА «Канопус»). На основе моделирования процессов мониторинга морской обстановки в Балтийском море спрогнозированы результаты космического мониторинга, а также определены ключевые проблемы и способы их решения, оценен текущий состав и возможные направления развития отечественной космической группировки. Сделан вывод, что существенное повышение результативности мониторинга требует увеличения числа спутников на орбите. Для непрерывного контроля безопасности на маршруте обоснована необходимость развертывания многоспутниковых группировок ДЗЗ и внедрения комплексов высокоскоростной обработки данных на судах и в центрах управления в реальном времени.

Ключевые слова: Калининградская область, транспортная связанность, грузоперевозки, судовождение, мониторинг морской обстановки, космические аппараты, дистанционное зондирование Земли.
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) 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., Родионов В.А., Калинов М.И., Ильина Н.Н. Мониторинг морской обстановки по маршруту «Усть-Луга – Балтийск» с применением отечественных космических систем дистанционного зондирования Земли. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 168—177. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.044

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.044

Maritime Situational Monitoring along the Ust-Luga – Baltiysk Route Using Domestic Space-Based Earth Remote Sensing Systems

Valery P. Govorukhin[1] vgovoruhin@iptran.ru**, Vladislav A. Rodionov**[2] var1959@mail.ru**,**
Mikhail I. Kalinov[2] cesavo@mail.ru, **Nataliya N. Ilina**[1] innmail@mail.ru
[1]Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences, [2]Saint Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

Abstract. Currently, the economic development of the Kaliningrad region is significantly dependent on maritime cargo transportation. This article analyzes the significance of the «Ust-Luga – Baltiysk» sea ferry line in ensuring the security and transport connectivity of the Kaliningrad region with the rest of the Russian Federation, particularly under the conditions of sanctions imposed by unfriendly countries. To ensure navigational safety, monitoring of the maritime environment along the «Ust-Luga – Baltiysk» route is required, which can be achieved through the use of domestic space systems, including Earth Remote Sensing (ERS) satellites (such as «Resurs-P», «Kondor-FKA» and «Kanopus»). Based on the modeling of maritime environment monitoring processes in the Baltic Sea, the efficiency of space-based monitoring is forecasted. Furthermore, key challenges and potential solutions are identified, and the current composition and prospective development directions of the domestic satellite constellation are evaluated.

© Говорухин В.П., Родионов В.А., Калинов М.И, Ильина Н.Н. 2026

It is concluded that a substantial improvement in monitoring efficiency necessitates an increase in the number of satellites in orbit.
To ensure continuous safety control along the route, the necessity of deploying multi-satellite ERS constellations and implementing high-speed data processing systems on board vessels and in control centers in real time is substantiated.
Keywords: Kaliningrad Oblast, transport connectivity, freight transportation, shipping, maritime situation monitoring, spacecraft, Earth remote sensing.
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) and the state assignment of the SPbRC RAS № 075-00614-26-00 на 2026 годand 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: Govorukhin V.P., Rodionov V.A., Kalinov M.I., Ilina N.N. Maritime Situational Monitoring along the Ust-Luga – Baltiysk Route Using Domestic Space-Based Earth Remote Sensing Systems, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 168—177. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.044

Введение

Калининградская область – самая западная область Российской Федерации, входящая в состав Северо-Западного федерального округа. Площадь региона составляет 15,125 тыс. км² [1], на начало 2026 г. численность населения Калининградской области составила 1 032 343 человек [2].

Специфика экономико-географического положения (ЭГП) Калининградской области обусловлена ее статусом полуэксклава. Сухопутные границы региона проходят исключительно сопредельно с иностранными государствами: на севере и востоке – с Литовской Республикой, на юге – с Республикой Польша, расстояние от Калининграда до польской границы составляет 35 км, до литовской границы – 70 км.

Область имеет выходы к морю, западные и юго-западные рубежи омываются Балтийским морем, а также Куршским и Калининградским заливами, гидрографически изолированными от открытой акватории узкими Куршской и Балтийской песчаными косами. Транспортная связь с основной территорией Российской Федерации осуществляется посредством морского и воздушного транспорта, а также за счет сухопутных автомобильных и железнодорожных перевозок, через транзитные коридоры Литовской Республики и Республики Беларусь.

Актуальность проблемы обеспечения безопасности области обусловлена окружением недружественных стран, входящих в блок НАТО, а именно: Республикой Польша и Литовской Республикой, пытающихся изолировать Регион от основной территории России и стороны суши, и со стороны Балтийского моря (рисунок 1).

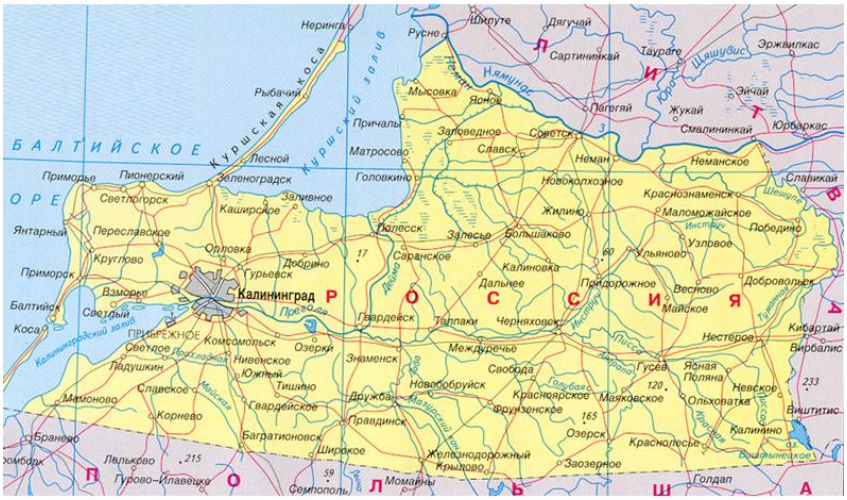


Рис.1Расположение Калининградской области на географической карте [1]

Роль морского паромного сообщения по маршруту «Усть-Луга – Балтийск» в интеграции Калининградского эксклава в единое пространство с РФ

Обеспечение транспортной связанности Калининградской области с остальной территорией РФ с 2022 года осложнено введением санкций со стороны Литовской Республики, поэтому с 2022 года морской транспорт играет особую роль в доставке грузов из регионов России и обратно.

С 2 по 4 марта 2026 года в Совете Федерации РФ состоялись Дни Калининградской области, посвящённые 80-летнему юбилею региона. На заседании комитета Совета Федерации по международным делам было отмечено: «Безусловным вызовом в условиях санкционных ограничений для Калининградской области стал

запрет на транзит практически 80 % грузов с основной территории РФ в Калининградскую область и обратно через территорию Литовской Республики. Переориентирование сухопутного транзита на морские перевозки стало важным шагом, влияющим на дальнейшее развитие экономики региона и на возможность выстраивания новых торгово-экономических связей с зарубежными странами».

На основе значений грузопотока в Калининградскую область и из нее [3] разработана таблица 1.

Таблица 1

Объем грузоперевозок в Калининградскую область и из нее различными видами транспорта в2021-2025 гг.

Вид транспорта	Единица	2021	2022	2023	2024	2025
Автомобильный	млн. тонн	1,97	1,64	1,2	0,84	0,6
Морской	млн. тонн	1,24	2,38	3,73	4,67	4,94
Железнодорожный	млн. тонн	13,77	10,24	8,08	6,71	5,46

Представленные данные отражают сокращение объемов перевозок грузов автомобильным и железнодорожным транспортом в период 2021-2025 гг. примерно в 3 раза, но в то же время – рост морских грузоперевозок в 4 раза.

Для морских грузоперевозок в Калининградскую область и из нее активно используются морские порты Усть-Луга и Калининград:

– морской порт Усть-Луга по грузообороту находится на втором месте в России и на первом месте в Балтийском бассейне - 135,0 млн т в 2024 году, 130,5 млн т в 2025 году;

– грузооборот морского порта Калининград в 2024 году составил 9,9 млн т, в 2025 году – 8,8 млн т.

В состав морского порта Калининград входит терминал в Балтийске: площадь терминала 25,8 га, 2 причала длиной 518 м, глубина у причалов – 9,7 – 10,3 м. Максимальные размеры обрабатываемых судов: длина – 200 м, осадка – 9,1 м.

Порты Усть-Луга и Балтийск обеспечивают функционирование критически важного транспортного коридора, поддерживающего социально-экономическую стабильность и технологический суверенитет Калининградской области в условиях санкционных ограничений на сухопутный транзит. Протяженность маршрута паромной линия «Усть-Луга – Балтийск» составляет примерно 508 морских миль (см. рисунок 2) [4]. Маршрут пролегает в условиях активного судоходства в водах Финского залива и Балтийского моря (см. рисунок 3) [5].

Стратегическую роль в обеспечении транспортной связанности Калининградской области с основной территорией Российской Федерации на морской паромной линии играют железнодорожные паромы проекта CNF05 «Амбал», «Балтийск», автомобильно-железнодорожные паромы проекта CNF19M «Маршал Рокоссовский», «Генерал Черняховский» и грузопассажирский паром типа RO-PAX «Антей» [6].

С целью наращивания количества паромов в феврале 2026 года положительно рассмотрен вопрос о строительстве двух новых паромов по проекту CNF19M, которые планируется вывести на морскую паромную линию «Усть-Луга – Балтийск» в 2028 году. Введение дополнительных судов в эксплуатацию позволит оптимизировать логистические потоки и минимизировать зависимость региона от транзитных коридоров, проходящих по территории недружественных государств.

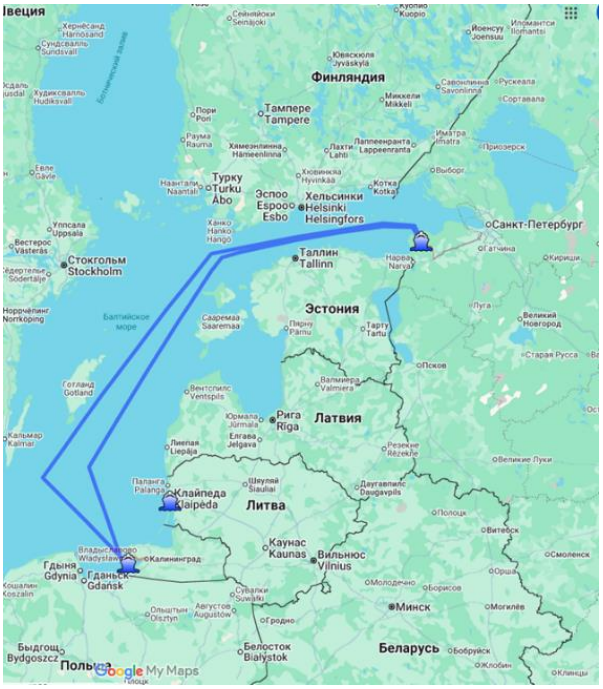


Рис. 2. Маршрут морской паромной линии «Усть-Луга – Балтийск» [4]

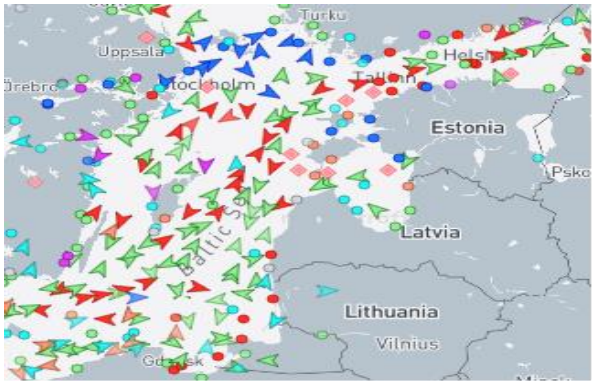


Рис. 3. Компьютерная визуализация интенсивности судоходства в Балтийском море и Финском заливе на 13.00 (время – московское) 28 апреля 2026 г. [5]

Ключевыми особенностями конструктивных и эксплуатационных характеристик автомобильно-железнодорожных паромов проекта CNF19M являются:

– наличие судовой энергетической системы, адаптированной к использованию дизельного топлива и сжиженного природного газа (СПГ);

– применение в качестве топлива СПГ, обеспечивающего существенное сокращение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, что оптимизирует экологические параметры функционирования судов;

–паромы данного проекта стали первыми в Российской Федерации верифицированными морскими автономными надводными судами (МАНС), функционирующими в режиме дистанционного управления на базе средств автономной навигации. Руководство судовождением осуществляет внешний капитан Центра дистанционного управления (ЦДУ), находящегося в Пассажирском порту Санкт-Петербург, при этом штатный экипаж на борту судна выполняет функции аварийного резервирования для минимизации рисков и страховки в случае возникновения внештатных ситуаций.

Анализ современного состояния глобального судоходства показывает, что условием обеспечения безопасности судовождения являются непрерывный мониторинг и оперативное реагирование на динамические изменения морской обстановки. Данный фактор определяет необходимость формирования постоянно действующей системы ситуационного наблюдения в стратегически важных акваториях, включая Балтийское море.

В качестве базового технологического элемента инфраструктуры контроля целесообразно использовать отечественные космические системы (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Параметры наклонения солнечно-синхронных орбит космических аппаратов (КА) ДЗЗ (≈ 97 градусов) позволяют им решать задачи наблюдения за морской обстановкой в различных районах Балтийского моря, в том числе и по маршруту «Усть-Луга – Балтийск».

Мониторинг морской обстановки с применением отечественных космических систем дистанционного зондирования Земли по маршруту «Усть-Луга – Балтийск»

Обеспечение безопасности мореплавания невозможно без регулярного обновления данных о текущей обстановке на морских акваториях. Получение таких данных возможно с использованием космических, воздушных, наземных и морских технических средств, функционирующих в различных диапазонах электромагнитных волн. Особое место среди этих технических средств занимают отечественные КС ДЗЗ, обладающие уникальными информационными свойствами, важнейшими из которых являются глобальность, регулярность (периодичность) и оперативность получения информации в различных регионах нашей планеты, в том числе в районах Балтийского моря и по маршруту «Усть-Луга–Балтийск». В настоящее время задачи регулярного наблюдения за судоходством в Балтийском море могут решаться с помощью отечественных космических аппаратов (КА) двух типов: радиолокационного наблюдения (РЛН), функционирующих в любое время суток, и оптико-электронного наблюдения (ОЭН), работа которых ограничена светлым временем суток и гидрометеорологической обстановкой [7-9].

По состоянию на 01.06.2026 г. на низких (высота полета – 475-520 км) солнечно-синхронных орбитах находятся и решают поставленные задачи девять таких космических аппаратов ДЗЗ типа «Кондор-ФКА», «Ресурс-П» и «Канопус».

Наличие на побережье Балтийского моря других средств наблюдения за морскими судами позволяет формировать априорную информацию, необходимую для направления антенных устройств или всего космического аппарата на ограниченную часть морской акватории и фиксации (с требуемой разрешающей способностью) признаков объектов наблюдения (ОН) в текущем пролете КА. Такой подход к ведению наблюдения за морскими судами в регионе обеспечивает максимальную реализацию потенциальных возможностей КА.

При проведении исследований было выполнено моделирование процесса применения отечественных КС ДЗЗ в Балтийском море и по маршруту «Усть-Луга – Балтийск» с применением многомодельного имитационно-моделирующего комплекса информационных космических систем (МИМК ИКС) с использованием сценарно-временного и разностно-долготного методов, позволяющих получать оценки искомых показателей [10-13].

В качестве показателя обеспеченности данными о морской обстановке в регионе и по указанному маршруту перехода была выбрана вероятность периодического наблюдения за морскими объектами (далее – вероятность слежения). Было задано два значения допустимого времени устаревания данных $T_{уст.}$ – 3 часа и 6 часов.

Искомые вероятности слежения для $T_{уст}$ обозначены W_z и W_s, соответственно. При заданном времени устаревания данные КС ДЗЗ сохраняли свою актуальность для органов управления судоходством в Балтийском море и для других потребителей информации.

Периодичность наблюдения за морскими объектами (далее – периодичность) оценивалась 80% квантилем T(0,8) – максимальным значением интервала между обнаружениями ОН с вероятностью не ниже 0,8.

При моделировании осуществлялась оценка среднего количества обнаружений ОН в сутки (далее – количества обнаружений) $k_{ср.}$ путем осреднения получаемых данных о количестве обнаруженных объектов при их действиях по индивидуальным сценариям (сценарно-временной метод) или данных о попаданиях отдельных квантов района в захваты по долготе (разностно-долготный метод) по всем информативным пролетам КА $n_{инф}$ на интервале оценки.

Предполагалось, что КА ДЗЗ при пролете над Финским заливом и центральной частью Балтийского моря (районами маршрута «Усть-Луга – Балтийск») постоянно находились в зоне радиовидимости одного или нескольких наземных пунктов приема информации и осуществляли непосредственную трансляцию на них данных о морской обстановке в Балтийском море. Время наблюдения за ОН в указанных районах космическими аппаратами ОЭН было ограничено светлым временем суток (с 10 до 16 часов).

Рассматривались варианты, когда наблюдение за морскими судами осуществляется только КА РЛН (вариант № 1), и когда эта задача решается космическими аппаратами обоих типов (вариант № 2). Интервал оценки, на котором производилась

имитация неопределенности ОН в заданных районах и на маршруте перехода был ограничен тремя сутками или длительностью перехода морских судов со скоростями 10 и 15 узлов, соответственно. При моделировании перехода ОН было принято время выхода на заданный маршрут 00 часов 00 минут 00 секунд в первые (вторые, третьи, четвертые… десятые) сутки существования системы, т.е. произведено по 10 реализаций перехода по маршруту со сдвигом времени начала перехода на одни сутки.

Основные результаты моделирования и оценки показателей процесса применения отечественных КС ДЗЗ для обнаружения морских судов в Финском заливе, центральной части Балтийского моря и по маршруту «Усть-Луга–Балтийск» представлены в таблицах 2-4.

Основные обобщенные результаты прогнозирования применения КС ДЗЗ приведены в таблицах 5-7. В каждой ячейке таблицы приводятся минимальные/усредненные/максимальные значения оцениваемых показателей.

Таблица 2

Результаты моделирования и оценки показателей процесса применения отечественных КС ДЗЗ в Финском заливе (сценарно-временной/разностно-долготный методы)

Номер реализации	Оцениваемые показатели				
	Вероятность слежения W_z	Вероятность слежения W_s	Периодичность, T(0,8)	Количество обнаружений, $k_{ср.}$	Количество информативных пролетов, $n_{инф.}$
1	0,27/0,32	0,46/0,52	14,0/12,0	3,1/4,1	16/18
2	0,26/0,30	0,44/0,49	14,0/13,0	3,0/3,6	16/18
3	0,23/0,28	0,41/0,47	21,5/21,5	2,6/3,1	16/17
4	0,23/0,27	0,41/0,46	21,0/14,5	2,5/2,9	16/17
5	0,24/0,29	0,42/0,47	22,5/12,5	2,6/3,3	17/18
6	0,26/0,32	0,44/0,51	21,5/11,0	3,1/4,0	17/20
7	0,27/0,32	0,46/0,51	14,0/12,5	3,2/4,1	18/21
8	0,25/0,29	0,44/0,49	14,0/13,0	2,9/3,5	17/20
9	0,23/0,27	0,41/0,46	14,0/13,0	2,4/2,8	15/18
10	0,24/0,27	0,42/0,45	14,0/21,0	2,4/2,8	14/18

Таблица 3

Результаты моделирования и оценки показателей процесса применения отечественных КС ДЗЗ в центральной части Балтийского моря (сценарно-временной/разностно-долготный методы)

Номер реализации	Оцениваемые показатели				
	Вероятность слежения W_z	Вероятность слежения W_s	Периодичность, T(0,8)	Количество обнаружений, $k_{ср.}$	Количество информативных пролетов, $n_{инф.}$
1	0,25/0,25	0,45/0,44	14,0/13,0	3,1/2,9	12/11
2	0,21/0,24	0,39/0,43	21,5/12,5	2,4/2,5	10/9
3	0,23/0,20	0,40/0,36	23,0/23,0	2,3/2,2	10/11
4	0,23/0,27	0,41/0,46	22,0/22,0	2,9/3,3	12/13
5	0,26/0,31	0,46/0,51	14,0/11,0	3,3/3,7	13/14
6	0,26/0,31	0,44/0,52	14,0/13,0	3,5/3,7	13/12
7	0,24/0,24	0,42/0,41	14,0/22,5	2,9/2,5	11/9
8	0,21/0,24	0,37/0,42	23,5/21,5	2,4/2,3	11/8
9	0,22/0,23	0,41/0,40	15,0/11,5	2,3/2,7	10/10
10	0,23/0,30	0,41/0,50	15,0/11,0	2,7/3,7	11/14

Таблица 4

Результаты моделирования и оценки показателей процесса применения отечественных КС ДЗЗ для маршрута «Усть-Луга–Балтийск» (сценарно-временной метод, скорость ОН на переходе 10/15 узлов)

Номер реализации	Оцениваемые показатели				
	Вероятность слежения W_z	Вероятность слежения W_s	Периодичность, T(0,8)	Количество обнаружений, $k_{ср.}$	Количество информативных пролетов, $n_{инф.}$
1	0,12/0,12	0,24/0,25	25,0/12,0	1,7/1,0	3/2
2	0,13/0,17	0,26/0,30	35,5/22,5	2,4/1,4	4/3
3	0,08/–	0,16/–	46,0/–	1,5/–	3/–
4	0,09/0,23	0,17/0,38	24,0/13,0	1,7/2,6	3/5
5	0,09/–	0,17/–	24,0/–	1,5/–	3/–
6	0,12/0,16	0,24/0,28	36,0/25,0	1,5/1,4	3/3
7	0,07/0,06	0,15/0,11	35,5/12,0	1,0/0,5	2/1
8	0,16/0,12	0,32/0,18	22,5/35,5	2,7/1.5	5/3
9	0,07/0,08	0,14/0,16	46,5/12,0	1,0/1.0	2/2
10	0,17/0,22	0,33/0,37	24,0/13,0	2,7/2,5	5/5

Таблица 5

Результаты прогнозирования применения КС ДЗЗ в Финском заливе

Метод	Оцениваемые показатели				
	Вероятность слежения W_z	Вероятность слежения W_s	Периодичность, T(0,8)	Количество обнаружений, $k_{ср.}$	Количество информативных пролетов, $n_{инф.}$
Сценарно-временной	0,23/0,25/0,27	0,41/0,43/0,46	14,0/17,0/22,5	2,4/2,8/3,1	14/16,2/18
Разностно-долготный	0,27/0,29/0,32	0,45/0,48/0,52	11,0/14,5/21,5	2,8/3,4/4,1	17/18,5/21

Таблица 6

Результаты прогнозирования применения КС ДЗЗ в центральной части Балтийского моря

Метод	Оцениваемые показатели				
	Вероятность слежения W_z	Вероятность слежения W_s	Периодичность, T(0,8)	Количество обнаружений, $k_{ср.}$	Количество информативных пролетов, $n_{инф.}$
Сценарно-временной	0,21/0,23/0,26	0,37/0,42/0,46	14,0/17,5/23,5	2,3/2,8/3,5	10/11,3/13
Разностно-долготный	0,23/0,26/0,31	0,36/0,45/0,52	11,0/16,0/23,0	2,2/3,0/3,7	8/11,1/14

Таблица 7

Результаты прогнозирования применения КС ДЗЗ по маршруту «Усть-Луга–Балтийск»

Скорость на маршруте перехода, узл.	Оцениваемые показатели				
	Вероятность слежения W_z	Вероятность слежения W_s	Периодичность, T(0,8)	Количество обнаружений, $k_{ср.}$	Количество информативных пролетов, $n_{инф.}$
10	0,07/0,11/0,17	0,14/0,22/0,33	24,0/32,0/46,0	1,0/1,8/2,4	2/1,3/5
15	0,06/0,15/0,23	0,11/0,25/0,38	12,0/18,0/35,5	0,5/1,5/2,6	1/3/5

Анализ результатов прогнозирования применения отечественных КС ДЗЗ в указанных районах Балтийского моря и на маршруте «Усть-Луга–Балтийск» показал, что существующая орбитальная группировка (ОГ) отечественных КА ДЗЗ обладает ограниченными возможностями по обеспечению органов управления судоходством в Балтийском море и других потребителей информации данными о морской обстановке.

При допустимом времени устаревания данных $T_{уст.}$ = 3 часа вероятность слежения W_z в заданных районах Балтийского моря не превышает, в среднем, 0,23-0,29, а на маршруте перехода «Усть-Луга – Балтийск» – 0,11-0,15. Таким образом, 70-80% времени органы управления не обеспечены актуальными данными о морской обстановке в регионе, получаемыми от КС с отечественными КА ДЗЗ.

При $T_{уст.}$ = 6 часов значения вероятности слежения (W_s) повышается приблизительно в полтора-два раза и обеспеченность органов управления искомыми данными достигает, в среднем, 22-48%.

В связи со сравнительно небольшим количеством обнаружений ОН (в среднем, $k_{ср.}$ = 1,3-3,4) оцениваемая периодичность T(0,8) очень вариативна и имеет большой размах значений: от 11 до 46 часов.

Это обстоятельство связано со сравнительно небольшим интервалом оценки на маршруте перехода и ограниченностью состава ОГ отечественных КА ДЗЗ. При оценке периодичности в Финском заливе и центральной части Балтийского моря этот размах сокращается до 11-23,5 часа. Очевидно, что более высокая достоверность оценок периодичности может быть достигнута увеличением интервала оценки (например, до 6-12 суток), количества реализаций (например, до 50-100) и заданием времени начала интервала оценки в более широком диапазоне значений (например, с интервалом 3 месяца). Для этого целесообразно (в перспективе) выполнить дополнительные исследования с использованием МИМК ИКС.

Количество информативных пролетов $n_{инф}$ отечественных КА ДЗЗ минимально, в среднем, на маршруте перехода (1,3-3) и увеличивается в заданных районах до 11,1-8,5, что связано с увеличением (по сравнению с маршрутом перехода) интервала оценки и особенностями накрытия полосой обзора района наблюдения и сравнительно небольших (по сравнению с районом) динамичных областей возможного положения морских судов, осуществляющих переход по указанному маршруту.

Оценки вероятности слежения за ОН в Финском заливе и центральной части Балтийского моря, полученные сценарно-временным методом, на 3-5% ниже, чем аналогичные оценки, полученные разностно-долготным методом, что объясняется особенностями этих методов.

Периодичность, количество обнаружений ОН и количество информативных пролетов в указанных районах имеют большее отличие (до 10-15% соответственно). Поэтому представляется целесообразным в дальнейшем считать оценки, полученные указанными методами, как оценки снизу и оценки сверху.

Влияние скорости перехода ОН по маршруту на результаты обнаружения морских судов в Балтийском море неоднозначно. С одной стороны, при скорости 15 узлов ряд показателей имеет лучшие значения (W_z, W_s, T(0,8), $n_{инф}$), с другой стороны –

количество обнаружений несколько ниже, чем при скорости 10 узлов. (таблица 4).

Сравнительно невысокие значения вероятностей слежения за ОН связаны, в том числе, с тем обстоятельством, что при рассмотренном варианте № 1 построения ОГ информативны только КА РЛН типа «Кондор-ФКА», пролеты КА ОЭН типа «Ресурс-П» и «Канопус» приходятся на темное время суток.

При этом можно показать, что при сдвиге плоскостей орбит КА по долготе восходящего узла на 90 градусов (вариант № 2) можно получить значительно (в полтора-два раза) лучшие оценки вероятности слежения за морскими судами в регионе (до 0,45-0,71) (рисунки 4-9).

Кроме рассмотренных показателей результатов применения КС ДЗЗ на рисунке приведены данные об информативности КА – доле площади района dS, просмотренной каждым КА.

Указанное обстоятельство свидетельствует о необходимости дальнейших исследований и возможности обоснования выбора рациональных вариантов построения орбитальной группировки отечественных КА ДЗЗ, обеспечивающих лучшие значения оцениваемых показателей.



Рис. 4. Построение ОГ КА ДЗЗ (вариант № 1)



Рис. 5. Построение ОГ КА ДЗЗ (вариант № 2)

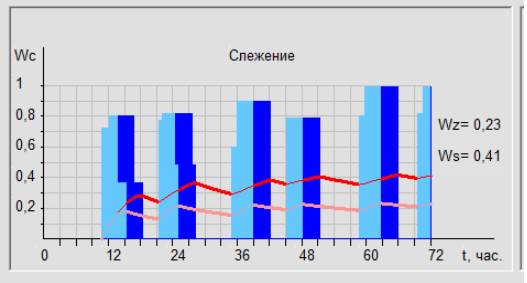


Рис. 6. Вероятность слежения при построении ОГ КА по варианту № 1

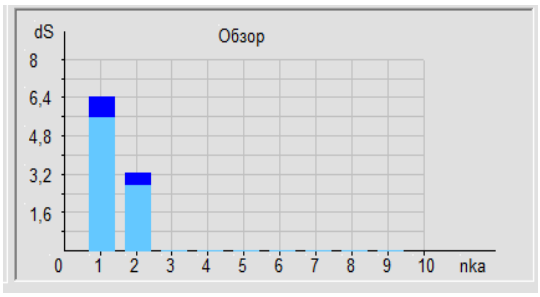


Рис. 7. Информативность КА при построении ОГ КА по варианту № 1

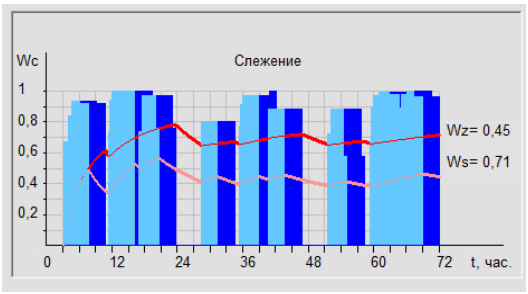


Рис. 8. Вероятность слежения при построении ОГ КА по варианту № 2

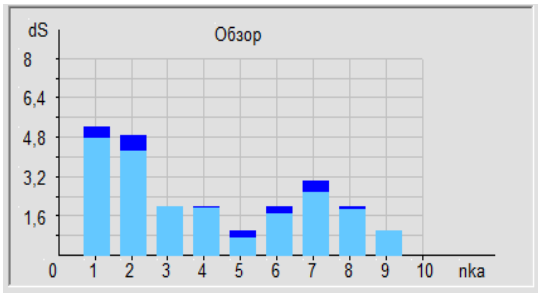


Рис. 9. Информативность КА при построении ОГ КА по варианту № 2

Большое влияние на временную задержку при получении органами управления судоходством и другими потребителями необходимой информации о морской обстановке по данным КА ДЗЗ оказывает время обработки информации на ППИ, которое составляет от 12 до 24 часов [7-9].

Суммарное время ожидания указанными потребителями данных о морской обстановке может составить от 23 до 70 часов. Такая задержка существенно ухудшает оперативность контроля за судоходством в Балтийском море и на маршруте «Усть-Луга – Балтийск».

Выполненные исследования показали, что для оперативного (с временем устаревания не более одного-полутора часов) получения органами управления и другими потребителями данных о морской обстановке в Балтийском море независимо от времени суток и гидрометеорологических условий необходимо иметь в составе отечественной орбитальной группировки не менее нескольких десятков космических аппаратов РЛН и осуществлять обработку принимаемой от КА информации в реальном масштабе времени, т.е. сократить время обработки информации до нескольких минут.

Выводы

1. В результате действия санкций со стороны недружественных стран, направленных, в том числе, на ухудшение транспортной связанности между Калининградской областью и остальной территорией РФ, в период 2021-2025 гг. объемы грузоперевозок автомобильным и железнодорожным транспортом сократились примерно в 3 раза, а морские грузоперевозки возросли в 4 раза.
2. Морская паромная линия «Усть-Луга – Балтийск» обеспечивает основной объем морских грузоперевозок в Калининградскую область и из нее по причинам наиболее короткого маршрута, глубоководных портов и наличия современных паромов на линии, включая железнодорожные паромы проекта CNF05 «Амбал», «Балтийск», автомобильно-железнодорожные паромы проекта CNF19M «Маршал Рокоссовский», «Генерал Черняховский» и грузопассажирский паром типа RO-PAX «Антей».
3. Значительная часть маршрута «Усть-Луга – Балтийск» проходит вблизи территориальных вод недружественных стран Прибалтики, что обуславливает необходимость развития системы мониторинга морской обстановки на Балтийском море с целью контроля и оперативного реагирования на ее изменения в интересах обеспечения безопасного судоходства.
4. Важными элементами системы мониторинга морской обстановки могут быть отечественные КС ДЗЗ, способные решать задачи мониторинга морской обстановки в Балтийском море и по маршруту «Усть-Луга – Балтийск». В настоящее время на низких (высота полета – 475-520 км) солнечно-синхронных орбитах находятся и решают поставленные задачи девять космических аппаратов ДЗЗ типа «Кондор-ФКА», «Ресурс-П» и «Канопус».
5. Результаты моделирования и оценки показателей процесса применения отечественных КС ДЗЗ свидетельствуют, что для решения задачи оперативного (с периодичностью 1,5 часа) мониторинга морской обстановки в Балтийском море и по маршруту «Усть-Луга – Балтийск» необходимо наращивание орбитальной группировки радиолокационного наблюдения с полосой обзора (захвата) 100-200 км. Передача информации о морской обстановке на наземные комплексы и ее обработка в реальном масштабе времени позволит соответствующим органам управления оперативно осуществлять контроль судоходства и формировать необходимые рекомендации по корректуре маршрута движения судов.

Литература

1. Большая российская энциклопедия [Электронный ресурс]. – URL: https://old.bigenc.ru/geography/text/2035827 (дата обращения: 12.03.2026).
2. Паспорт региона Российской Федерации. Калининградская область [Электронный ресурс]. – URL: https://rlw.gov.ru/storage/document/document_file/2026-02/16/kaliningrad.pdf (дата обращения: 12.03.2026).
3. Грузоперевозки по железной дороге снизились на 60,3 % за четыре года, по морю — выросли в 4 раза [Электронный ресурс]. – URL: https://rugrad.online/news/1457622/ (дата обращения: 12.03.2026).
4. Карта маршрута морской паромной линии «Усть-Луга – Балтийск» [Электронный ресурс]. – URL: https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1kXdRnz4vTqGSOgnD_5kpzL0j2gI&oe=utf-8&client=firefox&ie=UTF8&hl=ru&msa=0&source=embed&t=m&ll=58.170702504123845%2C20.4785153750000 2&spn=7.176561%2C17.578125&z=6 (дата обращения: 12.03.2026).
5. Интенсивность судоходства в Балтийском море и Финском заливе в 13.00 (время – московское) 28 апреля 2026 года [Электронный ресурс]. – URL: https://eurotek.ru/request/pozition/ (дата обращения: 12.03.2026).
6. 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. – С. 100–105.
7. Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос». Акционерное общество «Военно-промышленная корпорация «Научно-производственное объединение машиностроения». Руководство пользователя данными дистанционного зондирования Земли, получаемыми космической системой «Кондор-ФКА» [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: https://ntsomz.ru/wp-content/uploads/2023/05/2023.02.17.rukovodstvo.pol_zovatela.kondor-fka.dla_saita.pdf (дата обращения: 15.03.2026).
8. Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос». Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс». Руководство пользователя данными дистанционного зондирования Земли, получаемыми с космической системы «Ресурс-П» [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: http://www.roscosmos.ru/media/files/2024/rukovodstvo.pol_zovatela.dannimi.dzz.polucaemimi.s.ks.resurs-p.pdf (дата обращения: 15.03.2026).
9. Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос». Акционерное общество «Корпорация «ВНИИЭМ». Руководство пользователя данными дистанционного зондирования Земли, получаемыми космической системой «Канопус-В» [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: https://www.roscosmos.ru/media/files/2024/March/rukovodstvo.k-v.dla.saita.pdf (дата обращения: 15.03.2026).
10. Гуляков В. В., Калинов М. И., Родионов В. А., Торгашов А. А. Опыт разработки и применения имитационно-моделирующего комплекса информационных космических систем в научных исследованиях // Труды 18-й Всероссийской научно-практической конференции. – Т. 4. – СПб.: НПО Спецматериалов, 2015. – С. 131–137.
11. Гуляков В. В., Гуляков В. Э., Калинов М. И., Родионов В. А. Сценарно-временной метод прогнозирования результатов применения космических радиолокационных систем в интересах информационного обеспечения ВВСТ // Сборник научных трудов межотраслевой НПК «ВОКОР-2018». – СПб.: НИИ КиВ ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», 2018. – С. 101–106.

12. Калинов М. И., Родионов В. А. Имитационное моделирование при оценке возможностей обнаружения морских объектов космическими системами // Двенадцатая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2025): труды конференции, 15–17 октября 2025 г. – Санкт-Петербург: АО «ЦТСС», 2025. – 918 с. – С. 711–719.
13. Родионов В. А., Калинов М. И., Говорухин В. П. Возможности и перспективы мониторинга морской обстановки на Севморпути космическими средствами дистанционного зондирования Земли // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2025. – Т. 18, № 2. – С. 123–136.

References

1. Great Russian Encyclopedia [Electronic resource]. – URL: https://old.bigenc.ru/geography/text/2035827 (Accessed: March 12, 2026).
2. Passport of the Region of the Russian Federation. Kaliningrad Oblast [Electronic resource]. – URL: https://rlw.gov.ru/storage/document/document_file/2026-02/16/kaliningrad.pdf (Accessed: March 12, 2026).
3. Rail freight traffic decreased by 60.3% over four years, while sea freight grew fourfold [Electronic resource]. – URL: https://rugrad.online/news/1457622/ (Accessed: March 12, 2026).
4. Route map of the «Ust-Luga – Baltiysk» sea ferry line [Electronic resource]. – URL: https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1kXdRnz4vTqGSOgnD_5kpzL0j2gI&oe=utf-8&client=firefox&ie=UTF8&hl=ru&msa=0&source=embed&t=m&ll=58.170702504123845%2C20.4785153750000 2&spn=7.176561%2C17.578125&z=6 (Accessed: March 12, 2026).
5. Shipping intensity in the Baltic Sea and the Gulf of Finland at 1:00 PM (Moscow time) on April 28, 2026 [Electronic resource]. – URL: https://eurotek.ru/request/pozition/ (Accessed: March 12, 2026).
6. Govorukhin, V. P., Sokolov, Y. P., Ilyina, N. N., &Bystrova, N. Y. Methodology for quantitative assessment of pollutant emissions into the atmospheric air by dual-fuel road-rail ferries of the CNF19M project // *Marine Intellectual Technologies*. – 2026. – No. 1. – Pp. 100–105.
7. State Corporation for Space Activities «Roscosmos». Joint Stock Company «Military-Industrial Corporation «Scientific and Production Association of Mechanical Engineering». User guide for Earth remote sensing data obtained by the «Kondor-FKA» space system [Electronic resource]. – 2023. – URL: https://ntsomz.ru/wp-content/uploads/2023/05/2023.02.17.rukovodstvo.pol_zovatela.kondor-fka.dla_saita.pdf (Accessed: March 15, 2026).
8. State Corporation for Space Activities «Roscosmos». Joint Stock Company «Rocket and Space Center «Progress». User guide for Earth remote sensing data obtained from the «Resurs-P» space system [Electronic resource]. – 2023. – URL: http://www.roscosmos.ru/media/files/2024/rukovodstvo.pol_zovatela.dannimi.dzz. polucaemimi.s.ks.resurs-p.pdf (Accessed: March 15, 2026).
9. State Corporation for Space Activities «Roscosmos». Joint Stock Company «Corporation «VNIIE M». User guide for Earth remote sensing data obtained by the «Kanopus-V» space system [Electronic resource]. – 2023. – URL: https://www.roscosmos.ru/media/files/2024/March/rukovodstvo.k-v.dla.saita.pdf (Accessed: March 15, 2026).
10. Gulyakov, V. V., Kalinov, M. I., Rodionov, V. A., &Torgashov, A. A. Experience in the development and application of a simulation modeling complex of information space systems in scientific research // Proceedings of the 18th All-Russian Scientific and Practical Conference. – Vol. 4. – St. Petersburg: Scientific and Production Association «Spetsmaterialov», 2015. – Pp. 131–137.
11. Gulyakov, V. V., Gulyakov, V. E., Kalinov, M. I., & Rodionov, V. A. Scenario-time method for forecasting the results of the application of space radar systems in the interests of information support of military and special equipment // Collection of scientific papers of the intersectoral Scientific and Practical Conference «VOKOR-2018». – St. Petersburg: Research Institute of Cybernetics and Armament of the Navy, Military Educational and Scientific Center of the Navy «Naval Academy», 2018. – Pp. 101–106.
12. Kalinov, M. I., & Rodionov, V. A. Simulation modeling in assessing the capabilities of detecting marine objects by space systems // Proceedings of the 12th All-Russian Scientific and Practical Conference on Simulation Modeling and its Application in Science and Industry «Simulation Modeling. Theory and Practice» (IMMOD-2025): Conference proceedings, October 15–17, 2025. – St. Petersburg: JSC «CTSS», 2025. – 918 p. – Pp. 711–719.
13. Rodionov, V. A., Kalinov, M. I., &Govorukhin, V. P. Capabilities and prospects of monitoring the marine environment on the Northern Sea Route using space-based Earth remote sensing tools // Fundamental and Applied Hydrophysics. – 2025. – Vol. 18, No. 2. – Pp. 123–136.

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.

ИНФОРМАЦИЯОБАВТОРАХ / 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

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

Родионов Владислав Александрович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук, 199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 5. e-mail: var1959@mail.ru

Vladislav A. Rodionov, professor, Dr. Sci. (Eng), Chief Researcher, Saint Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 5 Universitetskaya nab., Saint Petersburg,199034, Russian Federation. e-mail: var1959@mail.ru.

Калинов Михаил Иванович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук, 199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 5. e-mail: cesavo@mail.ru

Mikhail I. Kalinov, professor, Dr. Sci. (Eng), Leader Researcher, Saint Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 5 Universitetskaya nab., Saint Petersburg, 199034, Russian Federation. e-mail: cesavo@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

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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 05.06.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.06.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 10.07.2026.

Научная статья
УДК 656.61.052
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.045

Сравнительный анализ российских и международных средств навигационного оборудования в обеспечении безопасности судоходства в Арктике

Песцов И.Н.[1] pescov.i@edu.narfu.ru, **Вяткин Д.А.**[1] d.vyatkin@narfu.ru, **Малышева С.А.**[1] s.malysheva@narfu.ru
[1]Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Аннотация. В статье рассматривается важность средств навигационного оборудования (СНО) как элемент безопасности навигации в условиях экстремального холодного климата и проводится сравнительный анализ российских и международных решений в области навигационных систем, используемых в Арктике. В качестве международного примера рассматривается американская система плавучих СНО (буев), работающая в арктической части Аляски. В статье анализируются ключевые конструктивные, энергетические и эксплуатационные характеристики буев, а также рассматриваются различия в подходах к автоматизации российских (вдоль Арктического морского пути) и международных навигационных систем. Сравнение основано на пяти ключевых параметрах: тип конструкции, источник питания, уровень автоматизации, периодичность технического обслуживания и устойчивость к ледовым нагрузкам. Анализ показывает, что международные системы, в частности американская, делают акцент на высокие автономности, энергоэффективности и снижении эксплуатационных расходов, в то время как российские решения отдают приоритет структурной надежности и длительной эксплуатации в условиях экстремально холодного и ледового климата. На основе анализа определены ключевые тенденции и перспективные направления совершенствования навигационных систем на базе СНО для повышения надежности и безопасности навигации в Арктике, включая внедрение система дистанционного мониторинга и использование гибридных источников питания.
Ключевые слова: Арктическое судоходств, навигационное обеспечение, автоматизация энергообеспечения, Северный морской путь, экстремальные климатические условия, безопасность мореплавания, дистанционный мониторинг
Для цитирования: Песцов И.Н., Вяткин Д.А., Малышева С.А. Сравнительный анализ американских и российских маячных знаков в условиях Арктики, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 178—188. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.045

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.045

Comparative analysis of russian and international navigation equipment in ensuring safety of shipping in the Arctic

Ivan N. Pestsov[1] pescov.i@edu.narfu.ru, **Dmitry A. Vyatkin**[1] d.vyatkin@narfu.ru,
Svetlana A. Malysheva[1] s.malysheva@narfu.ru
[1]Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation

Abstract. This article examines the importance of aids to navigation (AtoN) as a safety element in extreme cold climates and provides a comparative analysis of Russian and international solutions for navigation systems used in the Arctic. The American system of floating aids to navigation (buoys) operating in Arctic Alaska is considered as an international example. The article analyzes the key design, power, and operational characteristics of the buoys and examines the differences in automation approaches between Russian (along the Arctic Sea Route) and international navigation systems. The comparison is based on five key parameters: design type, power source, level of automation, maintenance frequency, and resistance to ice loads. The analysis shows that international systems, particularly the American one, emphasize high autonomy, energy efficiency, and reduced operating costs, while Russian solutions prioritize structural reliability and long-term operation in extremely cold and icy climates. Based on the analysis, key trends and promising areas for improving navigation systems based on aids to navigation were identified to increase the reliability and safety of navigation in the Arctic, including the implementation of a remote monitoring system and the use of hybrid power sources.
Keywords: Arctic shipping, navigation support, energy supply automation, Northern Sea Route, extreme climatic conditions, navigation safety, remote monitoring
For citation: Ivan N. Pestsov, Dmitry A. Vyatkin, Svetlana A. Malysheva Comparative Analysis of American and Russian Lighthouses in the Arctic, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 178—188. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.045

Введение

Арктический регион играет жизненно важную роль в современном морском судоходстве, являясь ключевыми для развития международных навигационных и транспортным маршрутов. Помимо стратегически значимого Северного морскому пути (СМП), через Арктику проходит перспективный трансконтинентальный морской маршрут,

© Песцов И.Н., Вяткин Д.А., Малышева С.А. 2026

соединяющий страны Евразии с Северной Америкой. В экстремальных природно-климатических условиях Арктики – низкие температуры, ледовая обстановка, сильные ветры, периоды полярной ночи и ограниченная видимость – надежность навигационного обеспечения становится определяющим фактором безопасности судоходства.

Одним из ключевых элементов навигационного обеспечения являются средства навигационного оборудования (СНО) – береговые маяки, навигационные знаки и плавучие буи, которые обеспечивают ориентацию судна в сложных условиях, предотвращают аварийные ситуации и способствуют оптимизации маршрутов плавания. Важность этих объектов возрастает именно в арктическом судоходстве, где навигационные ошибки могут повлечь серьезные последствия для судов, экипажей и окружающей среды.

Актуальность данного исследования определяется несколькими факторами. Во-первых, увеличение судоходной активности на Северном морском пути и развитие трансконтинентальных морских маршрутов требуют совершенствования логистической и навигационной поддержки [3]. Во-вторых, требования Полярного кодекса и стандартов Международной ассоциации морских навигационных служб и маячных служб (IALA) обуславливают необходимостью внедрения передовых технологических решений для безопасного мореплавания [5]. В Российской Федерации основополагающими документами в этой области являются Инструкция по навигационному оборудованию (ИНО-2000) и РД 31.6.07-2002 (Инструкция по техническому обслуживанию средств навигационного оборудования морских подходных каналов и акваторий портов), которые регламентируют классификацию, требования к СНО, а также периодичность и порядок их технического обслуживания. В-третьих, различия в подходах к проектированию и эксплуатации маячных знаков в США и России требуют детального сравнительного анализа для выявления лучших практик и определения направлений модернизации отечественной системы навигационного обеспечения [9].

Целью данной работы является проведения сравнительного анализа конструктивных, энергетических и эксплуатационных характеристик американских и российских средств навигационного оборудования (СНО) в Арктике для выявления оптимальных решений по повышению надежности навигационного обеспечения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– рассмотреть особенности американских навигационных систем в арктическом регионе (на примере Аляски) с акцентом на технические характеристики оборудования;

– проанализировать российский опыт эксплуатации средств навигационного оборудования (как береговых, так и плавучих) на трассах Северного морского пути;

– провести сравнительную оценку двух подходов по ключевым параметрам: конструкция, энергообеспечение, автоматизация, периодичность технического обслуживания и адаптация к ледовым нагрузкам;

– на основе выявленных различий сформулировать рекомендации по совершенствованию навигационного обеспечения в российской Арктике с учетом международных стандартов и современных технологических решений, а также требования к кибербезопасности.

Практическая значимость данного исследования заключается в его потенциале повышения безопасности и эффективности арктического судоходства за счет оптимизации систем навигационного обеспечения. Сравнительный анализ американских и российских подходов к проектированию, установке и эксплуатации представляет собой передовые решения, которые могут быть реализованы для улучшения судоходства в суровых климатических условиях. Использование современных технологических и методологических решений, адаптированных к суровым природным и климатическим условиям, обеспечивает надежность навигационного оборудования, снижает эксплуатационные ограничения и позволяет эффективно контролировать его состояние. Кроме того, выявленные практики и рекомендации могут быть использованы при планировании новых арктических маршрутов, модернизации существующих навигационных систем и обеспечение безопасности регионального судоходства.

Американские средства навигационного оборудования в Арктике

Американская система средств навигационного оборудования охватывает материковую часть Аляски и представляет собой разветвленную сеть навигационного оборудования, обслуживаемая Береговой охраной США (U.S. Coast Guard). В американской практике делается акцент на автономность, модульность и энергоэффективность. При этом современные, передовые системы СНО стали чрезмерно обширными по своему охвату и сложной логистике в отдаленных районах.

Ключевую роль в поддержке навигационного оборудования играет Aids to Navigation Team (ANT) Kodiak – команда Береговой охраны базирующая в Кодиак(Аляска). Зона ответственности ANT Kodiak охватывает впечатляющую территорию в 300 000 квадратных миль и обсуживает около 110 средств навигационного оборудования, включая маяки, береговые знаки и плавучие буи, на пространстве от залива Аляска до мыса Барроу на севере.

Работа в арктических условиях Аляски требует особых подходов:

– Обслуживание с использованием авиационной техники: Примерно 90% объектов технического обслуживания и ремонта обслуживаются с помощью вертолетов HH-60J Jayhawk. Это связано с тем, что многие средства навигационного оборудования расположены на труднодоступных скалистых берегах и недоступны по воде. Специалисты ANT Kodiak проходят обучение и сертификацию по эксплуатации вертолетов для технического обслуживания и ремонта.

– Строительство на месте: В отдаленных районах, где транспортировка сборных конструкций затруднена, команда строит навигационную башню непосредственно на месте. Оборудование

доставляется вертолетом в подвесном контейнере, а затем специалисты собирают конструкцию прямо на скальном выступе.

– Сезонные работы на Северном склоне: Ежегодно с мая по июль ANT Kodiak проводит свою ежегодную экспедицию «North Slope Trip» для обслуживания около 40 СНО за Полярным кругом, когда ледовые условия благоприятны для проведения операций.

– Подготовка кадров: Береговая охрана США регулярно проводит учебные сборы "Buoy Tender Roundup" в Джуно (Аляска), где специалисты со всего арктического региона отрабатывают навыки строительства навигационных башен, обслуживания буев и обмениваются лучшими практиками.

Технические характеристики

Американские средства навигационного оборудования в Арктике оснащаются:

– Солнечными панелями мощностью от 50 до 300 Вт

– Литий-ионными или свинцово- кислотным аккумуляторами емкостью 200-400 А*ч

– Светодиодными светооптическими аппаратами мощностью 10-30 Вт (дальность видимости 5-15 морских миль) [6]

– Система дистанционного мониторинга с передачей данных через спутниковые каналы (Iridiim, Inmarsat) [11]

Новые разработки

ВМС США совместно с Океанографиским институтом Вудс-Хоул разрабатывают перспективную систему Arctic Mobile Observing System (AMOS) – арктическую мобильную систему наблюдения. Эта система включает в сеть акустических буев и автономных подводных аппаратов, способных работать подо льдом в радиусе 100 км от центрального узла. Прототипы были реализованы в 2024 году [15].

Примеры американских навигационных буёв в арктическом контексте:

1. Временный сезонный навигационный буй, устанавливаемый Береговой охраной США в заливе Аук-Бэй (Auke Bay) близ Джуно, Аляска. Такие буи маркируют безопасные фарватеры и предупреждают о навигационных опасностях в летний период, когда судоходство наиболее активно. Согласно данным Local Notice to Mariners USCG, сезонная навигация в этих районах обычно длится с июня по октябрь, после чего буи демонтируются во избежание повреждения льдами .

Технические особенности:

– Тип: сезонный плавучий буй

– Энергопитание: солнечные панели + аккумуляторы

– Источник света: светодиодный (LED)

– Обслуживание: ANT Kodiak / Station Juneau.

2. Временные и сезонные навигационные буи, устанавливаемые Береговой охраной для обозначения опасных участков в северных водах Аляски. Например, в Local Notice to Mariners указывалось о временной установке буйка «Auk Recreation» вблизи бухты Аук-Бэй для поддержки безопасного судоходства в этой зоне; такие буи часто действуют в навигационный сезон, а затем снимаются перед ледоставом.



Рис. 1 Буй «Auk Recreation»

Американский подход ориентирован на минимизацию эксплуатационных затрат и снижение необходимости регулярных визитов технических служб, что особенно важно в труднодоступных районах Аляски.

Российские средства навигационного оборудования (СНО) в Арктике

Российская Федерация может похвастаться одной из самых протяженных в мире арктических береговых линий и обширной сетью средств навигационного оборудования (СНО), включая многочисленные маяки, береговые навигационные знаки и плавучие буи. Эти сооружения и технические средства обеспечивают безопасность судоходства по Северному морскому пути и прилегающим водам [5]. Исторически сложилось так, что береговые маяки и знаки в России проектировались как капитальные, прочные сооружения, способные выдерживать экстремальные климатические условия Северного Ледовитого океана (низкие температуры, сильные ветры, ледовые нагрузки) [8]. В настоящее время большая часть береговых средств навигационного оборудования на трассах Северного морскому пути переведена на возобновляемые источники питания (солнечные и ветроэлектрические установки) и функционирует в автоматическом режиме, что позволяет минимизировать присутствие обслуживающего персонала. Периодичность их технического обслуживания регламентируется руководящими документами (в том числе РД 31.6.07-2002) и, в значительной степени, определяется ледовой обстановкой в районе установки [2].

В отношении плавучих средств навигационного оборудования (буев) процесс внедрения автоматизации и гибридных источников питания шел более постепенно. Это связано с сезонным характером их эксплуатации, необходимостью ежегодной расстановки и снятия, а также высокими ледовыми нагрузками, предъявляющими особые требования к конструкции корпуса. Тем не менее, в последние годы и здесь достигнут существенный прогресс: современные буи оснащаются светодиодной оптикой, системой дистанционного контроля и комбинированными источниками питания (солнечные панели + высокоёмкие аккумуляторы)

Характерными чертами российских СНО являются:

– массивные, ледостойкие конструкции (особенно для восточного сектора Арктики);

– использование как автономных, так и традиционных источников энергоснабжения;

– ориентация на длительный срок службы и надежность в экстремальных условиях;

– сочетание современных технологий с элементами инфраструктуры советского периода.

Российские навигационные средства обладают уникальными характеристиками, адаптированными к арктическим условиям. Они устойчивы к ледовым нагрузкам и погодным условиям, оснащены автономными источниками света и сигналов и рассчитаны на длительную эксплуатацию даже при минимальном техническом обслуживании. Эти средства используются для обозначения морских путей, подходов к портам, узких каналов и транзитных зон, особенно в районах с переменным ледовым покровом.

Ведущей организацией, отвечающей за навигационное обеспечение на трассах Северного морского пути, выступает ФГУП «Гидрографическая предприятие» (входит в состав Государственной корпорации «Росатом».) Предприятие занимается установкой, обслуживанием и модернизацией навигационных средств по всему Северному морскому пути. Помимо этого, значительный объем работ выполняют бассейновые филиалы ФГУП «Росморпорт» (например, Северо-Восточный бассейновый филиал на Чукотке), а также гидрографические службы Северного флота.

Российские навигационные средства классифицируются по размеру и назначению. Самые большие прибрежные буи расположены на высоте четырех метров над ватерлинией и шести метров под ней и видны с расстояния трех морских миль. Цветовая кодировка стандартизирована на основе системы Международной ассоциации морских навигационных служб и маячных служб (IALA/MAMC): красные буи обозначают левую сторону фарватера, зеленые – правую.

В арктических водах используются специализированные ледостойкие буи, способные выдерживать низкие температуры (до -50°C), высокие ледовые нагрузки (уплотнение ледяного поля, ледяные гряды), длительные полярные ночи и штормы. Современные прибрежные буи оснащены светодиодной оптикой для определения дальности обнаружения от трех до пятнадцати морских миль и источником питания, сочетающим солнечные батареи и высокоёмкие аккумуляторы.

Примеры российских навигационных буёв в Арктике:

1. Современный навигационный буй типа «БЛ-78», устанавливаемый с борта нового плашкоута «Берингия» в акватории порта Анадырь на Чукотке. Эти буи обеспечивают безопасный заход крупнотоннажных судов в Анадырский лиман — ключевой транспортный узел Чукотки. Установка буев производится в летне-осеннюю навигацию, после чего они демонтируются на зимний период. Судно «Берингия» введено в эксплуатацию в 2025 году и способно совершать самостоятельные рейсы по всему Анадырскому заливу, включая удаленные терминалы Беринговский, Эгвекинот, Провидения и прибрежные села.

Технические особенности:

– Тип: плавучий навигационный буй (класс «река-море»)

– Энергопитание: автономное (солнечные панели + аккумуляторы)

– Источник света: светодиодный (LED), дальность видимости до 3-5 морских миль

– Обслуживание: Северо-Восточный бассейновый филиал ФГУП «Росморпорт»

– Установка: с борта плашкоута «Берингия» (грузоподъемность 35 тонн, кран 3 тонны)

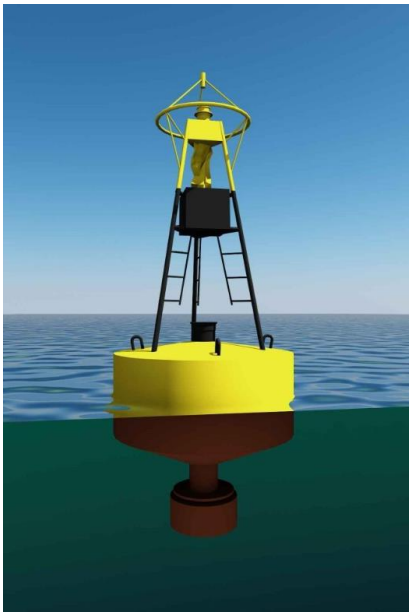


Рис. 2. Современный навигационный буй типа «БЛ-78»

2. Морской ледовый буй БМБЛ-78. Для наиболее суровых участков СМП – в первую очередь в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском – применяется морской ледовый буй БМБЛ-78 (Буй Морской Большой Ледовый, модель 78). Данный тип буя является «тяжелой» версией, предназначенной для круглогодичной эксплуатации в условиях высоких ледовых нагрузок.

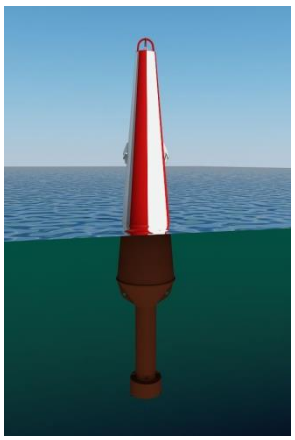


Рис. 3. Навигационный буй БМБЛ-78

Особенности конструкции:

– Металлический ледостойкий корпус, способный выдерживать сжатие ледяного поля и торошение;

– Непотопляемость обеспечивается водонепроницаемым переборками. Отсеки могут заполняться пенополиуретаном;

– При подвижке ледяного поля буй может уходить под лед, а затем всплывать в разводьях без потери функциональности.

Применение на СМП:

– Ограждение подходных каналов и навигационных опасностей в арктических морях (Карское, Баренцево, Лаптевых, Чукотское)

–Эксплуатируется как в восточном, так и в западном секторах Арктики;

– Установка и обслуживание осуществляется специализированными судами-буеустановщиками (например, суда проекта BLV01 способны единовременно перевозить до 4 таких буев с якорными устройствами)

БМБЛ-78 является наглядным примером российского подхода к проектированию средств навигационного оборудования для Арктики: приоритет отдается конструкционной надежности, ледостойкости и длительному сроку службы в экстремальным условиях, даже если это требует большей массы и более сложного обслуживания по сравнению с облегченными зарубежными аналогами.

3. В 2022 году Гидрографическое предприятие Росатома провело масштабную модернизацию навигационного оборудования на участке Северного морского пути от мыса Сопочная Карга до Дудинского морского порта. Это один из самых оживленных участков СМП, где интенсивность судоходства наиболее высока. Новыми программно-аппаратными комплексами оснащены 40 плавучих предостерегательных знаков (буев) на реке Енисей. Система успешно эксплуатируется и в 2024-2025 годах, подтвердив свою надежность.

Главная особенность модернизированных буёв – возможность дистанционного мониторинга в реальном времени в составе автоматизированной системы контроля средств навигационного оборудования (АСК СНО). Система позволяет определять:

– точную геолокацию каждого буя (контроль смещения)
– уровень заряда аккумуляторной батарей
– координаты смещения (если буй сдвинулся с якоря)
– деформацию и наклон корпуса
– исправность навигационного огня



Рис. 3. Модернизированный буй на реке Енисей

Такие буи играют важную роль в инфраструктуре навигационного обеспечения, являясь менее капитальными, но более гибкими средствами, чем традиционные маяки, и позволяют оперативно реагировать на изменения в ледовой обстановке и конфигурации фарватеров.

Эксплуатация этих буев требует скоординированных действий гидрографических служб, ледокольных флотов и судоходных компаний, и они являются не только технологическим активом, но и частью системы управления морской безопасностью в российской Арктике [10].

Сравнительный анализ американских и российских СНО

Арктическая навигация предъявляет высокие требования к системам обеспечения судоходства, что отражается в конструкции, эксплуатации и технических характеристиках СНО в США и России. Для объективного сравнения двух подходов был использован многомерный анализ, основанный на следующих критериях:

1. Конструктивные особенности – материал, прочность, модульность, возможность быстрой замены
2. Энергетическое обеспечение – тип источников питания, автономность, адаптация к полярной ночи
3. Автоматизация и дистанционный контроль – наличие систем мониторинга, передача данных
4. Периодичность обслуживания – частота технических осмотров и ремонтов (в соответствии с РД 31.6.07-2002 для российских СНО)
5. Адаптация к ледовым нагрузкам – устойчивость к сжатию льдом, возможность зимнего демонтажа

1. Конструктивные особенности

Американские плавучие средства навигационного оборудования (буи) почти всегда оснащены автономными модульными светооптическими аппаратами, что позволяет удобно хранить, быстро заменять и обслуживать их. Они питаются от электронных панелей и аккумуляторов, а в качестве источников света используют энергосберегающие светодиоды. Буи и отражатели спроектированы таким образом, чтобы минимизировать потребность в обслуживающем персонале, что особенно важно в отдаленных районах Аляски.

Российские береговые средства навигационного оборудования (маяки и навигационные знаки) традиционно представляли собой массивные, стационарные сооружения, рассчитанные на длительную эксплуатацию и способные выдерживать воздействие низких температур, ветра и ледовых нагрузок. В настоящее время большая часть береговых СНО на трассах Северного морского пути переведена на автоматический режим работы и возобновляемые источники питания (солнечные и ветроэлектрические установки).

Российские плавучие СНО (буи) также адаптированы к арктическим условиям и выполнены, как правило, в металлическом ледостойком исполнении. Периодичность их технического обслуживания регламентируется РД 31.6.07-2002 и связана с требованиями безопасности судоходства (оперативный контроль смещения с якоря,

исправности навигационного огня и т.д.), а не с конструктивным несовершенством

2. Автоматизация и дистанционное управление

В США широко используются автоматизированные и автономные системы поддержки навигации, интегрированные с системами дистанционного мониторинга. Плавучие буи могут передавать информацию о состоянии и местоположении в режиме реального времени, что снижает эксплуатационные расходы и позволяет быстро реагировать на изменение ледовых условий [12].

В России береговые средства навигационного оборудования были переведены на автоматический режим работы еще в 1980-1990-е годы. Что касается плавучих СНО (буев), то автоматизация и дистанционный контроль внедрялись постепенно. Однако в последние годы был достигнут прогресс: в 2022 году на реке Енисей была установлена автоматическая система дистанционного контроля СНО (АСК СНО), охватывающая 40 буев, что позволяет отслеживать состояние буев в режиме реального времени. Данные передаются исключительно беспроводным способом между буями и через спутник в центр управления в Санкт-Петербурге. На сегодняшний день такие системы пока не получили повсеместного распространения на всей акватории СМП, однако опыт их внедрения признан успешным.

3. Энергетическое обеспечение

В США широко используются солнечная энергия и энергоэффективное светодиодное освещение, что позволяет объектам работать автономно в течение длительных периодов времени без вмешательства человека. Солнечные панели на арктических буях имеют мощность 50–300 ватт, а литий-ионные батареи емкостью 200–400 Ач обеспечивают работу даже в полярные ночи.

В России береговые средства навигационного оборудования (маяки, навигационные знаки) были переведены на возобновляемые источники питания и автоматический режим работы в значительной степени еще в 1980-1990-е годы. На сегодняшний день большая часть береговых СНО на трассах Северного морского пути функционирует с использованием ветроэлектрическоих и солнечных установок, что позволяет существенно снизит эксплуатационные расходы и сократить присутствие обслуживающего персонала.

Что касается плавучих средств навигационного оборудования (буев), здесь исторически преобладали традиционные источники питания (щелочные и свинцово-кислотные аккумуляторы) с ежегодной заменой. Это связано с сезонным характером эксплуатации буев, необходимостью их снятия на зимний период и высокими ледовыми нагрузками, предъявляющими особые требования к конструкциям. Однако в последние годы и в этой области достигнут существенный прогресс. Солнечные панели установлены на 117 объектах арктического флота (включая береговые маркеры и некоторые типы буев). Опыт подтвердил их эффективность: продолжительности полярного дня достаточно для зарядки аккумуляторов, обеспечивающих полный цикл работы в течении полярной ночи.

В новейших российских разработках, таких как буй iceSVP-B (запуск 2025 года), и «Арктика-М», что обеспечивает технологический суверенитет и устойчивость каналов связи [7].

4. Примеры и масштабы

В США ключевыми примерами являются буи обслуживаемые командой ANT Kodiak, включая сезонные буи в заливе Аук-Бэй и буи, устанавливаемые с судов типа USCGC Firebrush. Система ориентирована на минимизацию затрат и высокую автономность объектов.

В России можно выделить буи типа «БЛ-78», устанавливаемые в Анадырском лимане с борта нового плашкоута «Берингия» (2025 год), а также модернизированные буи на реке Енисей с системами дистанционного мониторинга. Основной акцент – долговечность и устойчивость конструкций, при этом постепенно внедряются элементы автоматизации. Обобщенное сравнение двух подходов по ключевым параметрам представлено в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика американских и российских навигационных буёв в Арктике

Параметр	США	Россия
Конструкция	Модульная, быстромонтируемая, сезонная установка	Массивная, капитальная, круглогодичная эксплуатация
Энергопитание	Солнечные панели (50-300 Вт) + литий-ионные аккумуляторы	Гибридные системы (солнечные панели + аккумуляторы); для береговых СНО — преимущественно ВИЭ (солнечные, ветроэлектрические установки)
Автоматизация и контроль	Дистанционный мониторинг в реальном времени (спутниковая связь)	Традиционный визуальный контроль, внедрение мониторинга (Енисей, 40 буёв)
Кибербезопасность	Развита защита каналов связи; высокая цифровизация увеличивает поверхность для атак	Риски кибератак (подмена данных, ложное оповещение); требуется проработка защиты; резервирование традиционными методами контроля
Обслуживание	Минимизировано, редко требуется выезд	Регламентируется РД 31.6.07-2002
Адаптация к Арктике	Легкая и мобильная конструкция, устойчивость к льду	Круглогодичная эксплуатация, устойчивость к сжатию льдом и торошению
Основная цель	Снижение эксплуатационных затрат	Надежность и долговечность

Как видно из таблицы 1, ключевые различия между американским и российским подходами заключаются в постановке целей и исторически сложившихся операционных парадигмах.

Американские системы делают акцент на технологиях, ресурсосбережении и высокой автономности. Легкие модульные конструкции, оснащенные солнечными панелями и литий-ионными батареями, рассчитаны на работу без технического обслуживания от 1 до 3 лет. По сути, это «расходуемые» элементы инфраструктуры, которые проще заменить, чем отремонтировать. Такой подход оправдан на Аляске, где буи можно демонтировать зимой для сезонной навигации, а плановое техническое обслуживание невозможно из-за удаленного местоположения. Дистанционный мониторинг через спутник позволяет быстро отслеживать состояние и местоположение каждого буя.

Российские системы СНО формировались с учетом исторических особенностей (наследие советской инфраструктуры, акцент на долгосрочные капитальные сооружения) и для более суровых ледовых условий (особенно в северо-восточной Арктике, где ледяные стены и гряды намного выше, чем у побережья Аляски). Эти условия требуют повышенной прочности и устойчивости. Береговые СНО (маяки и знаки) уже длительное время функционируют в автоматическом режиме с использованием возобновляемых источников питания. Плавучие СНО (буи) спроектированы таким образом, чтобы выдерживать высокие ледовые нагрузки без демонтажа (на участках круглогодичной навигации). Это требует регулярных посещении гидрографических судов для технического обслуживания, периодичность которого регламентирована РД 31.6.07-2002.

Ключевые выводы из сравнения:

1. Американская система более гибкая и быстро обновляемая, позволяет оперативно реагировать на изменения фарватеров и ледовой обстановки за счет сезонной установки/демонтажа.

2. Российская система более устойчива к экстремальным ледовым нагрузкам в восточных районах Арктики (моря Лаптевых, Восточно-Сибирское), где лед может достигать толщины 2-3 метра и не тает полностью даже летом. На отдельных участках СМП обеспечивается круглогодичная навигация, что требует работы плавучих СНО в зимний период и не позволяет повсеместно применять сезонный демонтаж.

3. По энергоэффективности американские решения (солнечные панели + LED + литиевые аккумуляторы) превосходят российские аналоги по степени автономности. Однако в условиях полярной ночи (до 100 суток в высоких широтах) даже самые емкие аккумуляторы требуют подзарядки, и здесь традиционные источники питания остаются востребованными. Российский опыт показывает, что солнечные батареи эффективны даже в Арктике — продолжительности полярного дня достаточно для зарядки.

4. По автоматизации. Разрыв в уровне автоматизации между российскими и американскими плавучими СНО сокращается. Если ранее в США до 90% навигационных знаков имели дистанционный мониторинг, то внедрение автоматизированных систем контроля СНО на Енисее и использование спутниковых каналов в новых разработках демонстрирует движение России в строну цифровизации.

5. По кибербезопасности. Американские системы дистанционного мониторинга СНО характеризуются высоким уровнем цифровизации, что сопровождается активным развитием средств защиты информации. Российские АСК СНО находятся на этапе внедрения, и вопросы кибербезопансоти требует отдельной проработки. Сохранение традиционных методов контроля в российской практике может рассматриваться не как отставание, а как резервирование на случай компрометации цифровых каналов связи.

6. Оба подхода соответствуют требованиям Полярного кодекса и стандартов Международной ассоциации морских навигационных служб и маячных служб (IALA/MAMC), но реализуют их по-разному: США – через технологичность, модульность и высокую автономность плавучих СНО, Россия – через конструкционную надежность береговых и плавучих СНО, адаптацию к экстремальным ледовым нагрузкам, а также соблюдение требований национальных руководящих документов.

Заключение

Проведенный сравнительный анализ американских и российских средств навигационного оборудования в Арктике позволяет сформулировать следующие выводы.

1. По конструктивным особенностям. Выявлено, что американские палвучие СНО (буи) представляют собой модульные, автономные конструкции, ориентированные на минимизацию эксплутационных затрат и возможность быстрой замены. Российские буи, напротив, характеризуются массивными, капитальными конструкциями, рассчитанными на долговременную эксплуатацию в условиях экстремальных ледовых нагрузок, особенно в восточном секторе Арктики, где толщина льда может достигать 2-3 метров.

2. По энергетическому обеспечению. Американская система делает ставку на возобновляемые источники энергии (солнечные панели мощностью 50-300 Вт) и литий-ионные аккумуляторы, обеспечивающие автономную работу буёв в течение 1-3 лет. В российской практике исторически преобладали традиционные источники питания, однако в последние годы наметилась тенденция к внедрению солнечных батарей (установлены на 117 объектах Северного флота). Опыт подтвердил их эффективность: продолжительности полярного дня достаточно для зарядки аккумуляторов на полный цикл работы в течение полярной ночи. Новейшие российские разработки, такие как буи iceSVP-B (2025 год), используют передачу данных через отечественные спутниковые системы «Гонец» и «Арктика-М», что обеспечивает технологический суверенитет.

3. По автоматизации и дистанционному контролю. Американская система характеризуется высоким уровнем автоматизации: до 90% СНО интегрированы в системы дистанционного мониторинга с передачей данных через спутниковые каналы. В России этот процесс идет постепенно, однако успешный опыт модернизации 40 буёв на реке Енисей (2022 год) с

внедрением mesh-сети и спутниковой передачи данных в Санкт-Петербург демонстрирует движение в сторону цифровизации. Система позволяет в реальном времени отслеживать геолокацию, уровень заряда, смещение и наклон каждого буя.

4. По периодичности обслуживания. В США плавучие средства навигационного оборудования (буи) рассчитаны на минимальное обслуживание (как правило, 1 раз в 1-3 года) с сезонной установкой и демонтажем на зимний период. Такой подход обусловлен сравнительно мягкими ледовыми условиями в районах установки (север Аляски) и ориентацией на снижение эксплуатационных затрат.

В Российской Федерации переходность технического обслуживания средств навигационного оборудования регламентируется РД 31.6.07-2002 (Инструкция по техническому обслуживанию СНО морских подходных каналов и акваторий портов.)[2] Согласно данному документу, для береговых СНО, переведённых на автоматический режим работы, межремонтные сроки могут составлять до 6—12 месяцев. Для плавучих СНО (буев) периодичность осмотров (визуальный – с воды или воздуха) в период навигации выше – до 1 раза в месяц, что связано не с техническим несовершенством буев, а с требованиями безопасности судоходства: необходимостью оперативного контроля смещения буя с якоря, сохранности навигационного огня и т.д.

Кроме того, в российской Арктике на отдельных участках Северного морского пути (в первую очередь в западном секторе, где работают атомные ледоколы) обеспечивается круглогодичная навигация, что требует присутствия плавучих СНО в период ледостава. Это предъявляет повышенные требования к конструкции буев и не позволяет применять сезонный демонтаж, как в американской практике. Там, где это возможно, сезонная расстановке буев также применяется (например, в Анадырском лимане).

5. По адаптации к ледовым нагрузкам. Американский подход ориентирован на сезонную эксплуатацию: буи демонтируются на период ледостава, что снижает требования к ледовой прочности. Российская система, особенно в восточном секторе Арктики, должна обеспечивать работу в условиях, где лед не тает полностью даже летом. Это предопределяет необходимость создания особо прочных конструкций, способных выдерживать сжатие льдом и торошение.

6. О рисках кибербезопасности. Внедрение систем дистанционного мониторинга и передачи данных (АСК СНО) создает не только новые возможности для повышения надежности навигационного обеспечения, но и потенциальные уязвимости. В условиях современной геополитической ситуации средства навигационного оборудования могут рассматриваться как объекты критической инфраструктуры, подверженные риску кибератак. Подмена или блокировка навигационных данных, ложное оповещение о смещении буя или неисправности огня способны привести к дезорганизации судоходства и аварийным ситуациям. В связи с этим вопрос тотальной цифровизации СНО не может рассматриваться однозначно. При внедрении АСК СНО необходимо предусматривать шифрование передаваемых данных, резервирование каналов управления и сохранение традиционных (визуальных и радиотехнических) методов контроля в качестве резервных.

Несмотря на существенные различия в подходах, обе системы преследуют одну ключевую цель – обеспечить безопасность судоходства в суровых арктических условиях. Американская модель делает ставку на технологичность, автономность и снижение эксплуатационных затрат, что оптимально для условий Аляски с ее сезонной навигацией. Российская модель ориентирована на конструкционную надежность и долговечность, что продиктовано необходимостью обеспечения круглогодичной навигации на трассах Северного морского пути и более суровой ледовой обстановкой в восточном секторе Арктики.

Рекомендации по совершенствованию российской системы навигационных буёв

На основе сравнительного анализа рекомендуется реализовать ряд мер по повышению надежности и эффективности российских систем навигации в Арктике:

Одной из перспективных областей является разработка и внедрение автоматизированных систем контроля средств навигационного оборудования. Успешная реализация ячеистой (mesh) сети на реке Енисей (2022 год, 40 буёв) продемонстрировала высокую эффективность такой технологии для мониторинга плавучего навигационного оборудования в режиме реального времени. Сетевое решение позволяет быстро получать информацию о техническом состоянии буя, уровне заряда аккумуляторов, исправной работе осветительного оборудования и датчиков. Расширение этой практики на другие участки Северного морского пути, включая Обский залив, реку Лену и Колымский регион, позволит снизить затраты на инспекцию, уменьшить количество сервисных визитов и перейти к системе технического обслуживания, основанной на фактическом состоянии оборудования.

Внедрение систем дистанционного мониторинга с передачей данных через открытые каналы связи (включая спутниковые) создаёт потенциальные уязвимости для кибератак. Подмена или блокировка навигационных данных, ложное оповещение о смещении буя или неисправности навигационного огня могут быть использованы для дезорганизации судоходства и создания аварийных ситуаций. При развёртывании АСК СНО рекомендуется предусматривать шифрование передаваемых данных, резервирование каналов управления и сохранение традиционных (визуальных и радиотехнических) методов контроля в качестве резервных на случай компрометации цифровых каналов связи.

При модернизации навигационных буёв рекомендуется гибридный подход, сочетающий традиционные прочные конструкции с передовыми технологическими решениями. В восточных арктических регионах, таких как море Лаптевых и Восточно-Сибирское море, сохраняются крайне суровые ледовые условия, включая толстый лёд, высокое ледовое давление и значительные механические нагрузки. В таких условиях широко используемые в мире облегчённые конструкции могут оказаться недостаточно надёжными.

Рекомендуется сохранять прочную и ледостойкую конструкцию корпуса буя (в том числе металлическую), одновременно внедряя современные системы электропитания, автоматизации и дистанционного мониторинга по аналогии с буями, модернизированными в акватории реки Енисей.

Одной из ключевых областей совершенствования плавучих навигационных буёв является увеличение доли возобновляемых источников энергии в их энергоснабжении (береговые СНО уже в значительной степени переведены на ВИЭ). Практический опыт установки солнечных панелей на более чем 100 объектах инфраструктуры Северного флота продемонстрировал высокую эффективность солнечной энергии даже в высокоширотных регионах. Сочетание солнечных панелей с высокоёмкими аккумуляторными системами позволяет значительно снизить зависимость от традиционных источников питания и увеличить автономность буёв. Рекомендуется оснащать навигационные буи комбинированной системой электропитания (солнечные панели + высокоёмкие аккумуляторы), что особенно важно в отдалённых и труднодоступных районах Заполярья.

Одним из ключевых направлений является применение российских спутниковых систем для передачи данных с буёв. Потенциал такого подхода демонстрирует разработка навигационного буя «iceSVP-B» (завершена в 2025 году), передающего данные через спутниковые системы «Гонец» и «Арктика-М». Использование отечественных спутниковых систем обеспечивает стабильную передачу навигационной и технической информации даже в высокоширотных регионах, где работа зарубежных спутниковых систем может быть ограничена. Кроме того, развитие отечественной спутниковой инфраструктуры способствует повышению технической автономности и отказоустойчивости систем навигационного обеспечения. Рекомендуется распространить этот опыт на другие типы навигационных буёв, используемых вдоль Северного морского пути.

Внедрение круглогодичной навигации по Северному морскому пути потребует пересмотра существующих подходов к эксплуатации навигационных буёв. Согласно последним данным, в 2024 году вдоль СМП развёрнуто около 976 ледовых навигационных буёв, и это число продолжает расти. Для круглогодичной навигации традиционный метод сезонной установки и снятия буёв может оказаться недостаточно эффективным. Поэтому необходима разработка и создание навигационных буёв, способных работать круглый год без демонтажа, в том числе в условиях полярной ночи и экстремальных ледовых нагрузок. Это потребует усовершенствования конструкции корпуса, повышения энергоэффективности систем электропитания и внедрения автоматизированных систем мониторинга и диагностики оборудования [10], а также обеспечения кибербезопасности указанных систем.

Перспективы дальнейших исследований

Более детальный анализ эффективности различных технических решений был бы уместен, включая сравнительную оценку экономической целесообразности американского подхода (частая замена буев) и российского подхода (долгосрочная эксплуатация). Еще одним важным направлением является изучение возможности гармонизации требований к мобильным контрактам в рамках международного сотрудничества для повышения судоходности Северного морского пути. Это потребует приведения российских стандартов в соответствие со стандартами Международной ассоциации судоходных ассоциаций (IALA) и Полярного кодекса.

Литература

1. Инструкция по навигационному оборудованию: ИНО-2000. М., 2000.
2. Инструкция по техническому обслуживанию средств навигационного оборудования морских подходных каналов и акваторий портов: РД 31.6.07-2002. М., 2002
3. Бхагват Д.В. Морское судоходство в Арктике: вызовы и возможности повышения безопасности должны найти отражение в транспортной политике государства, изд. «Арктика и Север», 2023, №50, стр. 109-126
4. Киджи Д.С. Особенности определения места судна в высоких широтах, изд. «Транспортное дело России», 2018, № 5, стр. 131-133.
5. Катенин В.А., Дмитриев В.И. Навигационное обеспечение судовождения, изд. «Академкнига», 2006, 372 с.
6. Блинковский Н.К., Гулько В. Л., Мещеряков А. А. Навигационные групповые радиооптические отражатели кругового действия, изд. «Приборы и техника эксперимента», 2023, № 4, стр. 123-131
7. Четвергов Д.А., Никитинский М.С., Пономарёв А.С. Проблема спутникового обеспечения СМП для контроля ледовой обстановки, изд. «Перо», 2023, стр. 439-441
8. Мунарев А.Н. Этапы становления маячной службы в России, изд. «Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока», 2023, № 2, стр. 97-102.
9. Алексеева Е.Г., Лаврентьева Е.А. Зарубежный опыт управления навигационногидрографическим обеспечением судоходства, изд. «Эксплуатация морского транспорта», 2013, №2, стр. 13-18
10. Лебедев Г.В. Румянцев Г.Е. Перспективы развития арктической морской транспортной системы, изд. «Вестник», 2014, №3, стр. 179-188
11. Spilsbury J. Modernizing the Aids to Navigation Mission in the Electronic Navigation Age. Washington, изд. «Marine Safety@Security Council», 2025, Vol. 82, №1, стр. 79-83
12. Dagdilelis D., Blanke M., Andersen R., Galeazzi R. Cyber-resilience for marine navigation by information fusion and change detection. Oxford, изд. «Journal of Marine Navigation Research», 2022, стр. 1–14
13. Brown K.A. Analusis of USCG Raplacement Stern-Loading Buoy Boat Requirements for the Aids to Navigation Mission. Washington, изд. «U.S. Department of Transportation», 1993, стр. 1-120

14. U.S. Government Accountability Office. Coast Guard: Initiatives to Address Aids to Navigation Challenges Could Be Enhanced to Better Ensure Effective Implementation. Washington, изд. «GAO», 2020, стр. 1-67
15. Wright D., Janzen C., Bochenek R., Austin J., Page E. Marine Observing Applications Using AIS: Automatic Identification System. London, изд. "Frontiers in Marine Science", 2019, Vol. 6, стр. 1–12

References

1. Instrukciya po navigacionnomu oborudovaniyu: INO-2000 [Instructions for navigation equipment: INO-2000]. M., 2000.
2. Instrukciya po tehnicheskomu obsluzhivaniyu sredstv navigacionnogo oborudovaniya morskih podhodnyh kanalov i akvatorij portov: RD 31.6.07-2002 [Instructions for the technical maintenance of navigational equipment for marine approach channels and port waters: RD 31.6.07-2002]. Moscow, 2002
3. Bhagwat D.V. Morskoe sudohodstvo v Arktike: vyzovy i vozmozhnosti povysheniya bezopasnosti dolzhny najti otrazhenie v transportnoj politike gosudarstva [Maritime shipping in the Arctic: challenges and opportunities for improving safety should be reflected in the state transport policy], Publishing House "Arctic and North", 2023, No. 50, pp. 109-126
4. Kiji D.S. Osobennosti opredeleniya mesta sudna v vysokih shirotah [Features of determining the position of a vessel in high latitudes], Publishing House "Transport Business of Russia", 2018, No. 5, pp. 131-133.
5. Katenin V.A., Dmitriev V.I. Navigacionnoe obespechenie sudovozhdeniya [Navigation support for shipping], Publishing House "Akademkniga", 2006, 372 p.
6. Blinkovsky N.K., Gulko V.L., Meshcheryakov A.A. Navigacionnye gruppovye radiooptycheskie otrazhateli krugovogo dejstviya [Navigation group radio-optical reflectors of circular action], Publishing House "Akademkniga", 2018, No. 5, pp. 131-133. "Instruments and Experimental Equipment", 2023, No. 4, pp. 123-131
7. Chetvergov D.A., Nikitinsky M.S., Ponomarev A.S. Problema sputnikovogo obespecheniya SMP dlya kontrolya ledovoj obstanovki [The Problem of Satellite Support of the NSR for Ice Situation Monitoring], Pero Publishing House, 2023, pp. 439-441
8. Munarev A.N. Etapy stanovleniya mayachnoj sluzhby v Rossii [Stages of the Development of the Lighthouse Service in Russia], Scientific Problems of Transport of Siberia and the Far East Publishing House, 2023, No. 2, pp. 97-102.
9. Alekseeva E.G., Lavrentyeva E.A. Zarubezhnyj opyt upravleniya navigacionno-gidrograficheskim obespecheniem sudohodstva [Foreign Experience in Managing Navigational and Hydrographic Support for Shipping], Operation of Marine Transport Publishing House, 2013, No. 2, pp. 13-18
10. Lebedev G.V. Rumyantsev G.E. Perspektivy razvitiya arkticheskoj morskoj transportnoj sistemy [Prospects for the Development of the Arctic Maritime Transport System], Vestnik Publishing House, 2014, No. 3, pp. 179-188
11. Spilsbury J. Modernizing the Aids to Navigation Mission in the Electronic Navigation Age. Washington, Marine Safety@Security Council Publishing House, 2025, Vol. 82, No. 1, pp. 79-83
12. Dagdilelis D., Blanke M., Andersen R., Galeazzi R. Cyber-resilience for marine navigation by information fusion and change detection. Oxford, Journal of Marine Navigation Research Publishing House, 2022, pp. 1-14
13. Brown K.A. Analysis of USCG Raplacement Stern-Loading Buoy Boat Requirements for the Aids to Navigation Mission. Washington, U.S. Department of Transportation", 1993, pp. 1-120
14. U.S. Government Accountability Office. Coast Guard: Initiatives to Address Aids to Navigation Challenges Could Be Enhanced to Better Ensure Effective Implementation. Washington, ed. GAO, 2020, pp. 1-67
15. Wright D., Janzen C., Bochenek R., Austin J., Page E. Marine Observing Applications Using AIS: Automatic Identification System. London, ed. "Frontiers in Marine Science", 2019, Vol. 6, pp. 1–12

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

Песцов Иван Николаевич, студент 4 курса бакалавра, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В.Ломоносова, 163002, Российская Федерация, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17, e-mail: pescov.i@edu.narfu.ru

Ivan N. Pestsov, fourth-year bachelor's student, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 163002, Russian Federation, Arkhangelsk, Northern Dvina Embankment, 17, e–mail: pescov.i@edu.narfu.ru

Вяткин Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, доцент, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В.Ломоносова, 163002, Российская Федерация, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17, e–mail: d.vyatkin@narfu.ru

Малышева Светлана Анатольевна, старший преподаватель, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В.Ломоносова, 163002, Российская Федерация, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17, e–mail: s.malysheva@narfu.ru

Dmitrii A. Viatkin, Ph.D. (Eng), associate professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 163002, Russian Federation, Arkhangelsk, Northern Dvina Embankment, 17, e-mail: d.vyatkin@narfu.ru

Svetlana A. Malysheva, senior lecturer, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 163002, Russian Federation, Arkhangelsk, Northern Dvina Embankment, 17, e–mail: s.malysheva@narfu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 28.05.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 28.06.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 10.07.2026.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING

Научная статья
УДК 681.883.48
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.046

Метод разрешения двойственности положения автономных необитаемых подводных аппаратов в разреженных гидроакустических системах навигации

Дементьев К.В. [1] mash.saigon.89@gmail.com
[1]Севастопольский государственный университет

Аннотация. Рассматривается задача навигации автономного необитаемого подводного аппарата в разреженных гидроакустических системах с двумя базовыми модемами, для которых характерна геометрическая двойственность определения положения. Показано, что при использовании только измерений дальностей и информации о глубине возникают два зеркально-симметричных решения, что затрудняет устойчивую оценку состояния при асинхронных и редких обновлениях. Целью работы является разработка метода разрешения указанной двойственности без увеличения числа навигационных баз и без привлечения внешней априорной информации. В методе были использованы расширение вектора состояния, динамическая оценка по дальностям, гибридный фильтр Калмана и диффузная инициализация последнего. Предложено включать дальности до базовых модемов в состав вектора состояния и использовать их временную эволюцию для выбора физически согласованного решения. Результаты моделирования показывают, что предложенный метод обеспечивает устойчивую сходимость оценки положения при асинхронных измерениях и большой неопределённости начального состояния. Ограничения метода проявляются при движении строго параллельно базовой линии, что снижает информативность измерений. Достоверность результатов подтверждена серией численных экспериментов с реалистичными шумами датчиков. Полученные выводы позволяют рекомендовать метод для практического применения в разреженных гидроакустических навигационных системах при планировании траекторий с минимальными поперечными манёврами.
Ключевые слова: гидроакустическая навигация, разреженная навигация, двойственность положения, оценка состояния, расширение состояния, диффузная инициализация, фильтр Калмана.
Финансирование: Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках госзадания FEFM-2024-0015.
Для цитирования: Дементьев К.В. Метод разрешения двойственности положения автономных необитаемых подводных аппаратов в разреженных гидроакустических системах навигации, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 189—194. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.046

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.046

Position duality resolution method for autonomous underwater vehicles in sparse hydroacoustic navigation systems

Kirill V. Dementiev[1] mash.saigon.89@gmail.com
[1]Sevastopol state university, Sevastopol, Russian Federation

Abstract. The paper addresses the navigation problem of an autonomous underwater vehicle operating in sparse hydroacoustic systems with two base beacons, which are characterized by geometric position duality. When only range measurements and depth information are available, two mirror-symmetric position solutions arise, leading to instability of state estimation under asynchronous and infrequent updates. The objective of this study is to develop a method for resolving this duality without increasing the navigation beacons number or relying on external prior information. The research methods include state vector augmentation, dynamic range-based estimation, a hybrid Kalman filter, and diffuse initialization. The proposed approach incorporates ranges to the reference beacons into the state vector and exploits their temporal evolution to select the physically consistent solution. Simulation results demonstrate stable convergence of position estimates under asynchronous measurements and high initial uncertainty. Method limitations are observed for motion strictly parallel to the baseline, where measurement informativeness decreases. The results reliability is supported by numerical experiments using realistic sensor noise models. The obtained results indicate practical applicability of the method in sparse hydroacoustic navigation systems and support trajectory planning strategies that include minimal transverse maneuvers during initial localization.
Key words: hydroacoustic navigation, sparse navigation, position duality, state estimation, state augmentation, diffuse initialization, Kalman filter.
Financial Support: This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project FEFM-2024-0015.

© Дементьев К.В. 2026

For citation: Kirill V. Dementiev, Position duality resolution method for autonomous underwater vehicles in sparse hydroacoustic navigation systems, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 189—194. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.046

Введение

Точная навигация и управление автономными необитаемыми подводными аппаратами (АНПА) остаются критически важными задачами, особенно в условиях, когда развертывание полномасштабной акустической инфраструктуры нецелесообразно. Традиционные системы с длинной базовой линией (LBL) обеспечивают высокую точность навигации за счёт триангуляции с помощью нескольких фиксированных базовых модемов на дне моря. Однако такие системы требуют значительных усилий по установке и логистической поддержке, что ограничивает их применимость в динамичных или чувствительных к затратам миссиях. Количество эффективных и недорогостоящих решения крайне ограничено [1–5].

Конфигурации с разреженной LBL, в которых используются всего две базы, были предложены в качестве альтернативы большим массивам LBL. Существуют коммерческие системы, например, «HiPAP Sparse LBL» от Kongsberg [6], которая объединяет дальность LBL с фиксацией базовых модемов на поверхности и глубиной объектов для формирования их положений; Canopus/Ramses от Exail (iXblue) «Sparse-LBL» [7], которая связывает обновления дальности комплекса Ramses с бортовой системой ИНС; инструментарий Fusion 2 от Sonardyne [8] обеспечивает калибровку в реальном времени и рабочие процессы, адаптированные к развертыванию коммерческой системы «Sparse LBL». Несмотря на свою практичность, эти подходы зависят от благоприятной геометрии расположения компонентов системы (когда рабочая область не пересекалась с базовой линией), внешней помощи операторов и строгой синхронизации по времени. Кроме того, асинхронные обновления и несовпадающие скорости передачи данных между датчиками усложняют оценку состояния АНПА и проектирование обратной связи для управления ими.

В отечественных исследованиях близкие задачи разреженной гидроакустической навигации АНПА рассматриваются, в частности, в работах Д. А. Кошаева и В. В. Богомолова, где неоднозначность при недостаточном числе маяков разрешается на основе рекуррентного байесовского оценивания и отношения апостериорных вероятностей альтернатив [9, 10].

Более комплексная постановка задачи навигации и управления группой АНПА в разреженной LBL-системе была представлена в [11]. В отличие от этой работы, настоящая статья сосредоточена на навигационной подзадаче: разрешении двухбазовой геометрической двойственности при большой неопределённости начального положения. Дополнительно рассматривается влияние частных геометрий движения относительно базовой линии, включая параллельное, почти параллельное движение и наличие поперечной, фактически перпендикулярной базовой линии, составляющей манёвра.

С учётом этого цель настоящей статьи состоит в уточнении условий применимости двухбазового метода и в выработке практической рекомендации по начальному манёвру АНПА, позволяющему быстрее устранить неоднозначность без увеличения числа базовых модемов.

1. Метод разрешения двойственности

1.1. Модель АНПА

Положение и ориентация АНПА описываются вектором $\eta = [\eta_1^T \quad \eta_2^T]^T$, где $\eta_1 = [x \quad y \quad z]^T$ и $\eta_2 = [\varphi \quad \theta \quad \psi]^T$, а скорости в локальной системе вектором $\nu = [\nu_1^T \quad \nu_2^T]^T$, где $\nu_1 = [u \quad v \quad w]^T$ и $\nu_2 = [p \quad q \quad r]^T$. Динамика шестистепенной модели [12] учитывает массы, присоединённые массы, кориолисовы и демпфирующие силы и имеет вид

$$\begin{gathered} M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau + J^T(\eta)\tau_e, \\ M = M_{RB} + M_A, \\ C(\nu) = C_{RB}(\nu) + C_A(\nu), \end{gathered} \tag{1}$$

где $M_{RB} \in \mathbb{R}^{6\times6}$ – матрица инерции твердого тела, $M_A \in \mathbb{R}^{6\times6}$ – матрица присоединенных масс, $C_{RB} \in \mathbb{R}^{6\times6}$ – кориолисова матрица твердого тела, $C_A \in \mathbb{R}^{6\times6}$ – кориолисова матрица присоединенных масс, $D \in \mathbb{R}^{6\times6}$ – матрица диссипативных сил, $g \in \mathbb{R}^{6\times1}$ – вектор сил и моментов, создаваемых гравитацией и плавучестью, $\tau \in \mathbb{R}^{6\times1}$ – вектор управляющих сил и моментов выраженный в локальной системе отсчета, $\tau_e \in \mathbb{R}^{6\times1}$ – вектор возмущающих сил и моментов выраженный в инерциальной системе отсчета, $J \in \mathbb{R}^{6\times6}$ – Якобиан, связующий инерциальную и локальную системы отсчета.

Объединяя вектор координат и ориентаций η с вектором скоростей ν в единый вектор состояния $\mathrm{x} = [\eta^T \quad \nu^T]^T$, динамику можно представить в форме нелинейной системы с зависящими от состояния коэффициентами

$$\begin{gathered} \begin{cases} \dot{\mathrm{x}} = \mathcal{A}(\mathrm{x},t)\mathrm{x} + \mathcal{B}(\mathrm{x},t)\mathbf{u}, \ \mathrm{x}(t_0) = \mathrm{x}_0, \\ \mathrm{y} = \mathcal{C}(t)\mathrm{x} + \mathcal{D}(t)\mathbf{u}, \end{cases} \\ \mathcal{A}(\mathrm{x},t) = \begin{bmatrix} 0_{6\times6} & J(\mathrm{x})^{-1} \\ 0_{6\times6} & -M^{-1}\big(C(\mathrm{x}) + D(\mathrm{x})\big) \end{bmatrix}, \\ \mathcal{B}(\mathrm{x},t) = \begin{bmatrix} 0_{6\times6} \\ M^{-1} \end{bmatrix}, \ \mathbf{u} = \tau + \mathbf{u}_{add}, \\ \mathbf{u}_{add} = J^T(\mathrm{x})\tau_e - g(\mathrm{x}), \end{gathered} \tag{2}$$

где $\mathcal{A} \in \mathbb{R}^{2n\times2n}$ – матрица динамики системы ($n = 6$ – число степеней свободы системы), $\mathcal{B} \in \mathbb{R}^{2n\times n}$ – матрица управления, $\mathcal{C} \in \mathbb{R}^{m\times2n}$ – матрица управления (m – число выходов системы), $\mathcal{D} \in \mathbb{R}^{m\times n}$ – матрица связи входа и выхода, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^{n\times1}$ – вектор управляющих сигналов, включающий в себя вектор внешних возмущений $\mathbf{u}_{add} \in \mathbb{R}^{n\times1}$.

Модели используемых датчиков АНПА учитывают шумы и дрейфы. Акселерометр и гироскоп описываются суммой истинного сигнала, белого шума и случайного смещения, моделируемого как процесс Маркова первого порядка. Доплеровский лаг выдаёт скорость аппарата относительно дна, а датчик глубины измеряет давление и преобразует его в глубину с учётом шума Гаусса. Магнитометр обеспечивает ориентацию по магнитному полю Земли. Для

акустической подсистемы измерения дальностей учитываются белый шум, влияние временного разрешения таймера и стабильность тактового генератора; выбрано микросекундное разрешение часов и стабильность термокомпенсированного кварцевого резонатора (ТСХО), обеспечивающего сантиметровую точность дальностей.

1.2. Навигация АНПА

Навигация по двум базам сводится к поиску пересечений двух окружностей с центрами в виде базовых модемов b_1 и b_2. При наличии двух наклонных дальностей r_1 и r_2 множество допустимых положений АНПА в трехмерном пространстве есть пересечение двух сфер, то есть окружность. Если глубина АНПА известна, то задача сводится к лишь двум возможным положениям – пересечениям двух окружностей на горизонтальной плоскости, зеркально расположенным относительно базовой линии (рис. 1).

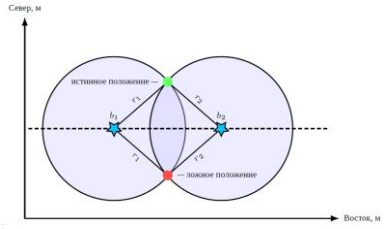


Рис. 1. Пример разреженной LBL-навигации

Пусть координаты базовых модемов заданы как $b_i = [x_i \quad y_i \quad z_i]^T$, где $i = 1{,}2$ а эффективные горизонтальные радиусы, скорректированные по известной глубине объекта навигации z, равны

$$\rho_i^{\perp} = \sqrt{max\{r_i^2 - (z - z_i)^2,\ 0\}},\ i = 1{,}2, \tag{3}$$

где r_i вычисляются общеизвестным образом по времени пролета сигнала t_i^{OWTT} и профилю скорости распространения акустического сигнала в воде $c(z)$ [13]

$$r_i = \frac{c(z)}{t_i^{\text{OWTT}}}. \tag{4}$$

Определим вектор смещения и его норму

$$\Delta x = x_2 - x_1,\ \Delta y = y_2 - y_1,\ d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}. \tag{5}$$

Скалярное расстояние от b_1 до линии пересечения тогда равно

$$a = \frac{(\rho_1^{\perp})^2 - (\rho_2^{\perp})^2 + d^2}{2d}, \tag{6}$$

а длина полухорды, перпендикулярной этой линии, равна $h = \sqrt{(\rho_1^{\perp})^2 - a^2}$.

Средняя точка на линии между двумя центрами окружностей находится в точке

$$x_m = x_1 + a\frac{\Delta x}{d},\ y_m = y_1 + a\frac{\Delta y}{d}. \tag{7}$$

Наконец, две возможные позиции АНПА получаются как

$$x = x_m \pm h\frac{\Delta y}{d},\ y = y_m \mp h\frac{\Delta x}{d}. \tag{8}$$

Предлагаемый способ выбора истинной позиции из двух возможных базируется на использовании фильтра Калмана.

1.3. Оценка состояния АНПА

Указанная ранее двойственность устраняется динамической оценкой состояния АНПА. При этом требуется расширенный вектор состояния

$$\mathbf{x} = [\mathrm{x}^T \quad r_1 \quad r_2]^T \in \mathbb{R}^{(2n+2)\times 1}, \tag{9}$$

где x – часть состояния, описывающая динамику и кинематику АНПА, $[r_1 \quad r_2]$ – часть состояния, описывающая динамику дальностей.

Производные указанных дальностей выражаются как

$$\dot{r}_i = \frac{(\eta_1 - b_i)^T(\dot{\eta}_1 - \dot{b}_i)}{r_i}. \tag{10}$$

В квазистационарном режиме $\dot{b}_i \approx 0$, а линейные скорости $\dot{\eta}_1$ определяются через матрицу вращения и вектор скоростей ν_1:

$$\dot{\eta}_1 = R_I^B(\eta_2)^{-1} \cdot \nu_1. \tag{11}$$

Изменения дальностей во времени (10) позволяют устранить геометрическую двойственность: пары производных $(\dot{r}_1,\ \dot{r}_2)$ для зеркально-симметричных потенциальных положений имеют противоположные знаки. Поэтому фильтр Калмана удерживает на выходе ту оценку положения, при которой наблюдаемое изменение дальностей согласуется с предсказанием. В результате, невязки между измерениями и оценкой состояния (инновации) остаются малыми только для правильной ветви, и оценка сходится без скачков между зеркальными решениями. Диффузная инициализация [14, 15] даёт дополнительную возможность учесть большую неопределённость начального состояния и обеспечивает надёжную быструю сходимость оценок к истинному состоянию даже при асинхронных обновлениях.

Для оценивания состояния в условиях разрежённых измерений применяется гибридный фильтр Калмана, объединяющий непрерывную динамику системы с дискретными обновлениями по дальностям OWTT. Дискретно-непрерывная постановка обеспечивает согласование непрерывных уравнений движения с редкими акустическими измерениями и датчиками инерциального модуля, доплеровского лага, магнитометра и датчика глубины.

Диффузная инициализация означает, что дисперсия в слабом (поперечном) направлении принимается сколь угодно большой; в реализации используются большие, но конечные значения, чтобы сохранить устойчивость системы при вычислениях. В декартовых координатах это сводится к увеличению диагональных элементов $P_0(x,x)$ и $P_0(y,y)$. Искусственный «бесконечный» внедиагональный элемент $P_0(x,y) = P_0(y,x)$ не требуется. Остальные априорные оценки (глубина, ориентация, линейные и угловые скорости, дальности) задаются по точности соответствующих датчиков без искусственного увеличения дисперсий.

2. Результаты работы метода

Представленный рис. 2 иллюстрирует положительное влияние диффузной инициализации. Две зеркально симметричные возможные траектории показаны в виде затухающей «змейки» относительно базовой линии. Начальная оценка преднамеренно размещена на неверной стороне. При диффузном значении $P_0(x,x) \gg 1$ фильтр Калмана переходит на динамически согласованную ветвь за короткий переходный интервал, даже при редких обновлениях по OWTT. На начальном интервале времени возможны скачки оценки. После этого перехода траектория оценки устанавливается и следует требуемому пути с ограниченными отклонениями.

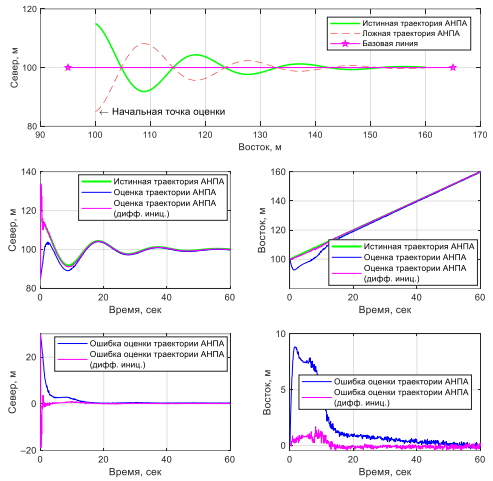


Рис. 2. Пример влияния диффузной инициализации

Для оценки состояния параметры матрица ковариации процессного шума Q и матрица ковариации измерений R для отдельных компонентов фильтра Калмана заданы в соответствии с табл. 1.

Если аппарат движется строго параллельно базовой линии (рис. 3), поперечное возбуждение минимально, и информативность по времени, содержащаяся в эволюции дальности, ослабевает. Сходимость при этом сохраняется, но протекает медленнее и выигрывает даже от малых манёвров, которые восстанавливают свойства сходимости (рис. 4).

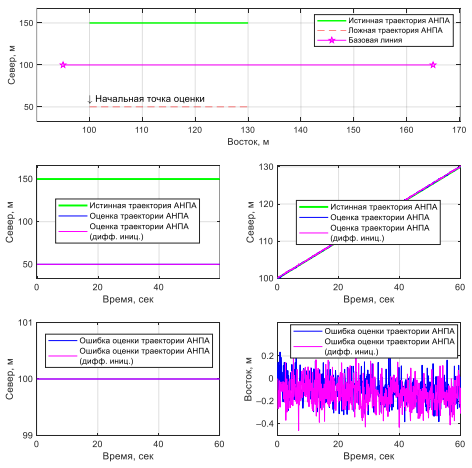


Рис. 3. Пример влияния диффузной инициализации

Сравнение подходов к инициализации фильтра Калмана по метрике RMSE приведено в табл. 2. Здесь заметен недостаток метода при абсолютно параллельном движении относительно базовой линии.

Первый сценарий содержит поперечные участки движения относительно базовой линии, поэтому он отражает случай, в котором в измерениях появляется перпендикулярная составляющая манёвра. Именно эта составляющая делает временную эволюцию дальностей различимой для двух зеркальных ветвей. Напротив, при строго параллельном движении информативность дальностей по поперечной координате минимальна, что и объясняет сохранение большой ошибки по соответствующей компоненте.

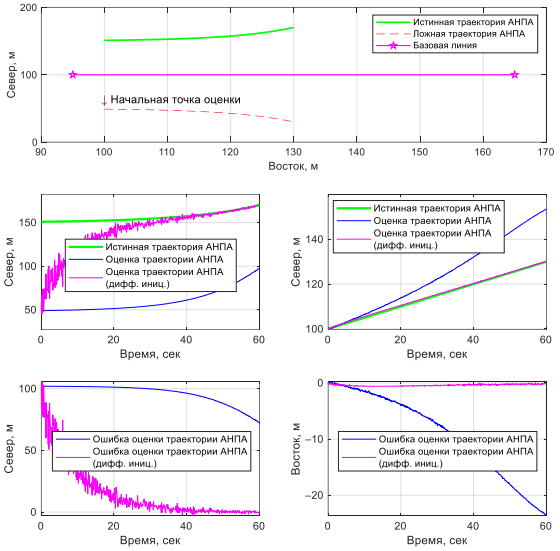


Рис. 4. Пример влияния диффузной инициализации

Таблица 1

Параметры измерений АНПА

Измерения	Параметры
r_1	1 Гц, $\mathcal{N}(0, 0.01)$
r_2	1 Гц, $\mathcal{N}(0, 0.01)$
z	50 Гц, $\mathcal{N}(0, 0.01)$
φ	25 Гц, $\mathcal{N}(0, 0.05)$
θ	25 Гц, $\mathcal{N}(0, 0.05)$
ψ	25 Гц, $\mathcal{N}(0, 0.05)$
u	50 Гц, $\mathcal{N}(0, 0.025)$
v	50 Гц, $\mathcal{N}(0, 0.025)$
w	50 Гц, $\mathcal{N}(0, 0.025)$
p	50 Гц, $\mathcal{N}(0, 0.05)$
q	50 Гц, $\mathcal{N}(0, 0.05)$
r	50 Гц, $\mathcal{N}(0, 0.05)$

Сценарий на рис. 3 практически невыполним. Реальные траектории АНПА содержат как правило изменения по всем степеням свободы. При этом ограничения метода не исключаются.

Для устранения недостатков метода предлагается планировать движение АНПА по

кривой, для начальной калибровки (при неопределенности начального положения), а затем производить плавание в штатном режиме.

Таблица 2

Сравнение инициализаций фильтра Калмана

Метрика	Стандартная инициализация	Диффузная инициализация
Маневр «змейкой» относительно базовой линии		
RMSE	x: 3.7041 y: 3.0192	x: 1.3061 (-64.740%) y: 0.2543 (-91.577%)
Движение параллельное базовой линии		
RMSE	x: 100.0000 y: 0.1306	x: 100.0000 (0.000%) y: 0.1221 (-6.547%)
Движение почти параллельное базовой линии		
RMSE	x: 96.3160 y: 11.7402	x: 27.1398 (-71.822%) y: 0.4127 (-96.485%)

Практически такой режим может применяться, например, при обследовании подводной кабельной линии, трубопровода или протяжённого донного объекта, когда установка полноценной LBL-сети экономически нецелесообразна. Два временных базовых модема задают локальную навигационную базу, а АНПА перед основным проходом вдоль объекта выполняет короткий поперечный калибровочный манёвр. После выбора корректной ветви решения аппарат переходит к штатному движению вдоль трассы объекта с использованием уже согласованной оценки положения.

Заключение

Разработан метод компенсации геометрической двойственности в разреженной двухбазовой LBL-системе гидроакустической навигации на основе расширения вектора состояния АНПА дальностями и применения гибридного фильтра Калмана с диффузной инициализацией, что позволяет обеспечивать устойчивую сходимость оценки при редких и асинхронных акустических измерениях по OWTT.

Отдельно рассмотрено влияние геометрии траектории на разрешение неоднозначности. Показано, что строго параллельное движение относительно базовой линии является неблагоприятным частным случаем, тогда как даже небольшой поперечный манёвр существенно повышает информативность дальномерных измерений и ускоряет выбор физически согласованной ветви.

Литература

1. Campagnaro F., Steinmetz F., Renner B.-C. Survey on Low-Cost Underwater Sensor Networks: From Niche Applications to Everyday Use // JMSE. 2023. Т. 11. № 1. С. 125.
2. Jiang Y., Renner B.-C. Low-Cost Underwater Swarm Acoustic Localization: A Review // IEEE Access. 2024. Т. 12. С. 25779–25796.
3. Garin R. и др. A Low-Cost Communication-Based Autonomous Underwater Vehicle Positioning System // JMSE. 2024. Т. 12. № 11. С. 1964.
4. Матвиенко Ю. В. Гидроакустические средства навигации подводных роботов: технологии создания и применения. Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2024. 320 с.
5. Кебкал К. Г., Машошин А. И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24, №3 (94). С. 115-130.
6. HiPAP Sparse LBL [Электронный ресурс]. URL: https://www.kongsberg.com/globalassets/kongsberg-discovery/navigation--positioning/apos/hipap-application-note-sparse-lbl.pdf (дата обращения: 01.12.2025).
7. Subsea Positioning Technologies [Электронный ресурс]. URL: https://www.unmannedsystemstechnology.com/wp-content/uploads/2020/06/Subsea-Positioning-Technologies.pdf (дата обращения: 01.09.2025).
8. Fusion 2 – Sonardyne [Электронный ресурс]. URL: https://www.sonardyne.com/product/fusion-2/ (дата обращения: 01.09.2025).
9. Кошаев Д. А., Богомолов В. В. Алгоритм длиннобазовой навигации автономного необитаемого подводного аппарата при отсутствии априорных данных о его местоположении и разреженном расположении маяков // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2024. Т. 67. № 12. С. 1052–1064.
10. Кошаев Д. А., Богомолов В. В. Длиннобазовое подводное позиционирование с комплексированием измерений, полученных до и после начала решения, и устранением неоднозначности. Часть 1. Математическое описание // Гироскопия и навигация. 2025. Т. 33. № 1. С. 125–145.
11. Kabanov A. A., Dementiev K. V., Kramar V. A. Leader–Follower Motion Control System for a Group of AUVs via Hybrid Measurement Sparse LBL Navigation // Journal of Marine Science and Engineering. 2026. Т. 14. № 4. С. 358.
12. Fossen T. I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. Hoboken, NJ Chichester, West Sussex: Wiley, 2021.
13. Dhanak M. R., Xiros N. I. Springer Handbook of Ocean Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2016.
14. Kabanov A. A., Kramar V. A. The SDC Kalman Filter for Nonlinear System with Uncertainty in Initial Conditions // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, Russia: IEEE, 2020. С. 1015–1019.
15. Skorohod B. A. Diffuse Initialization of Kalman Filter // Journal of Automation and Information Sciences. 2011. Т. 43. № 4. С. 20–34.

References

1. Campagnaro F., Steinmetz F., Renner B.-C. Survey on Low-Cost Underwater Sensor Networks: From Niche Applications to Everyday Use. JMSE. 2023. Vol. 11. № 1. P. 125.

2. Jiang Y., Renner B.-C. Low-Cost Underwater Swarm Acoustic Localization: A Review. IEEE Access. 2024. Vol. 12. P. 25779–25796.
3. Garin R. et al. A Low-Cost Communication-Based Autonomous Underwater Vehicle Positioning System. JMSE. 2024. Vol. 12. № 11. P. 1964.
4. Matvienko Yu. V. Hydroacoustic Means of Navigation for Underwater Robots: Technologies of Creation and Application. Vladivostok: IPMT FEB RAS, 2024. 320 p.
5. Kebkal K. G., Mashoshin A. I. Hydroacoustic Methods of Positioning Autonomous Unmanned Underwater Vehicles // Gyroscopy and Navigation. 2016. Vol. 24, №3 (94). P. 115-130.
6. HiPAP Sparse LBL [Electronic resource]. URL: https://www.kongsberg.com/globalassets/kongsberg-discovery/navigation--positioning/apos/hipap-application-note-sparse-lbl.pdf (accessed on: 01.12.2025).
7. Subsea Positioning Technologies [Electronic resource]. URL: https://www.unmannedsystemstechnology.com/wp-content/uploads/2020/06/Subsea-Positioning-Technologies.pdf (accessed on: 01.09.2025).
8. Fusion 2 – Sonardyne [Electronic resource]. URL: https://www.sonardyne.com/product/fusion-2/ (accessed on: 01.09.2025).
9. Koshaev D. A., Bogomolov V. V. Long baseline navigation algorithm for an autonomous underwater vehicle in the absence of a priori data on its location and sparse beacon arrangement. Journal of Instrument Engineering. 2024. Vol. 67. No. 12. P. 1052–1064.
10. Koshaev D. A., Bogomolov V. V. Long-baseline underwater positioning with integration of measurements obtained before and after the start of solution and ambiguity resolution. Part 1. Mathematical description. Gyroscopy and Navigation. 2025. Vol. 33. No. 1. P. 125–145.
11. Kabanov A. A., Dementiev K. V., Kramar V. A. Leader–Follower Motion Control System for a Group of AUVs via Hybrid Measurement Sparse LBL Navigation. Journal of Marine Science and Engineering. 2026. Vol. 14. No. 4. P. 358.
12. Fossen T. I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. Hoboken, NJ Chichester, West Sussex: Wiley, 2021.
13. Dhanak M. R., Xiros N. I. Springer Handbook of Ocean Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2016.
14. Kabanov A. A., Kramar V. A. The SDC Kalman Filter for Nonlinear System with Uncertainty in Initial Conditions. 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, Russia: IEEE, 2020. P. 1015–1019.
15. Skorohod B. A. Diffuse Initialization of Kalman Filter. Journal of Automation and Information Sciences. 2011. Vol. 43. № 4. P. 20–34.

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

Дементьев Кирилл Валерьевич, аспирант кафедры «Искусственный интеллект и автономные системы управления», Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: mash.saigon.89@gmail.com

Kirill V. Dementiev, graduate student of the «Artificial Intelligence and Autonomous Control Systems» department, Sevastopol state university, Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: mash.saigon.89@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 19.05.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.06.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 17.06.2026.

Научная статья
УДК 621.86
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.047

Вероятностно-статистический метод определения запасных частей на устройства подъемно-транспортного оборудования

Аблязов Э.К.[1] amigab@mail.ru, **Аблязов К.А.**[1] kiril123@bk.ru
[1]Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф.Ушакова

Аннотация. В работе рассматривается вероятностно-статистический метод определения потребности в запасных частях на устройства подъемно-транспортного оборудования (ПТО) за годы эксплуатации или жизненный цикл по данным журнала эксплуатации группы однотипного оборудования ПТО. Количественной характеристикой, позволяющей оценивать потребность в запасных частях, являются данные ведущей функции потока отказов или замен $\Omega(t)$ за время работы устройств ПТО, так как она является полным показателем безотказности ремонтируемого изделия, и им удобно пользоваться как для нормирования безотказности устройств ПТО, так и при практических расчетах и сравнениях показателей надежности различных конструкций устройств ПТО. В связи с имеющимся разбросом работы устройств ПТО при эксплуатации в реальных условиях для определения ведущей функции потока отказов применяется композиция нормальных законов распределения отказов устройств ПТО за календарный год эксплуатации. Объем выборки оценивается числом отказов одновременно эксплуатируемых устройств ПТО с учетом полученной от каждого из них информации с журнала учета неисправности (отказов). При таком подходе обеспечивается достаточный объем выборки и тем самым достаточно адекватная вероятность оценки потребности в запасных частях на устройства ПТО за годы эксплуатации и за жизненный цикл. Применение разработанного метода позволит производить расчеты потребности ЗИП группы однотипных устройств ПТО в эксплуатационных условиях.
Ключевые слова: подъемно-транспортное оборудование, ведущая функции потока отказов, параметр потока отказов, математическое ожидание отказа, среднее квадратическое отклонение.
Для цитирования: Аблязов Э.К., Аблязов К.А. Вероятностно-статистический метод определения запасных частей на устройства подъемно-транспортного оборудования. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 195—202. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.047

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.047

Probabilistic and statistical method for determining spare parts for lifting and transport equipment

Emil K. Ablyazov[1] amigab@mail.ru, **Kemal A. Ablyazov**[1] kiril123@bk.ru
[1]Admiral Ushakov Maritime State University, Russian Federation

Abstract. The paper considers a probabilistic-statistical method for determining the need for spare parts for lifting and transport equipment (LTE) over the years of operation and over the life cycle, based on the operation log of a group of similar LTE equipment. The leading function of the failure or replacement flow $\Omega(t)$ is a quantitative characteristic that allows for the estimation of the need for spare parts. This function is a complete indicator of the reliability of the repaired product, and it can be used for both the standardization of the reliability of PTO devices and for practical calculations and comparisons of the reliability of different LTE device designs. Due to the existing spread of the operation of LTE devices in real conditions, a composition of normal laws of distribution of failures of LTE devices for a calendar year of operation is used to determine the leading function of the flow of failures. The sample size is estimated by the number of failures of simultaneously operated LTE devices, taking into account the information obtained from each of them from the fault (failure) log. This approach ensures a sufficient sample size and, therefore, a sufficiently accurate assessment of the need for spare parts for LTE devices over the years of operation and over the life cycle. The use of this method allows for the calculation of the spare parts requirements for a group of similar LTE devices under operational conditions
Keywords: lifting and transport equipment, leading failure flow functions, failure flow parameter, mathematical expectation of failure, standard deviation.
For citation: Emil K. Ablyazov, Kemal A. Ablyazov Probabilistic and statistical method for determining spare parts for lifting and transport equipment. Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 195—202. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.047

Введение

Большинство устройств ПТО являются изделиями, состоящими из элементов и деталей, которые могут подвергаться восстановлению многократно и тех, которые не восстанавливаются и замена их производится по потребности. Нормирование ресурсов может быть достаточно условным и носящим технико-экономический и расчетный характер. Фактические значения ресурсов используются для определение запасов устройств, расхода запасных частей и затрат на создание и поддержание этих запасов [1]. В основе методик расчета всех норм расхода запасных частей

© Аблязов Э.К., Аблязов К.А. 2026

положены данные по надежности и условиям эксплуатации автомобилей и тракторов. Методы определения норм расхода запасных частей могут быть следующими: а) аналитический (точный) метод расчета; б) приближенная оценка нормы расхода запасных частей по ресурсу до 1-й замены детали; в) определение нормы расхода запасных частей по среднему числу замен деталей за срок службы изделия; г) определение средней нормы расхода запасных частей методом дополнительного учета вариации ресурса деталей [1].

В дальнейшем под запасными инструментами и принадлежностями (ЗИП) будем понимать совокупность запасов сменных изделий, материалов, инструментов и принадлежностей для обслуживания технических средств и предназначенная для его функционирования, технического обслуживания и ремонта.

Качество подъемно-транспортного оборудования (ПТО), как правило, изменяется в процессе эксплуатации в результате изменения самого ПТО или материала и составных элементов. В практике организации эксплуатации технических систем вопросы обоснования требуемого количества запасных изделий, необходимых для бесперебойного функционирования оборудования, имеют первостепенное значение [2].

В процессе работы ПТО проходит несколько стадий эксплуатации. В зависимости от стадии эксплуатации изменяются показатели надежности ПТО, а также способы их вычисления. В период нормальной эксплуатации, например, параметр потока отказов является приблизительно постоянной величиной. На стадиях приработки и старения параметр потока отказов в одном случае убывает, а в другом – возрастает со временем. В общем случае могут быть и другие более сложные зависимости этой характеристики от времени. Обработка данных об отказах и неисправностях ПТО, представляющих собой случайные величины, производится статистическими методами. Наиболее часто для описания наработок (ресурсов) деталей и агрегатов ПТО используются законы распределения: Вейбулла, нормальный, экспоненциальный, Рэлея [3].

Возможен подход к расчету показателя надежности (ПН), когда расчет параметров ПН детали выполняется только до первого отказа (замены), а параметры ПН до последующих отказов (второго, третьего и др.) определяются с помощью корреляционных зависимостей, устанавливаемых по результатам статистической обработки данных эксплуатируемых ПТО. Такой подход правомерен по двум причинам: во-первых, при расчете ПН детали до первого отказа в ряде случаев можно не учитывать изменение характеристик нагрузочного режима и предельных состояний, т. е. упрощение является оправданным; во-вторых, корреляционные зависимости объективно отражают взаимосвязь между причинами отказов деталей и параметрами распределений их ресурсов, что существенно упрощает всю процедуру расчета [3, 4, 5].

Методы расчета показателей надежности могут быть разделены на три группы: расчет ресурса элементов деталей или модели отказов элементов; расчет ресурса деталей, включающих несколько элементов, или модели отказа деталей; расчет показателей надежности агрегатов автомобиля как сложных восстанавливаемых систем [3].

Для расчета потоков отказов устройств ПТО необходимо знать законы распределения ресурсов деталей до первого и последующих отказов. Практически во всех исследованиях отмечается уменьшение средних наработок с увеличением номера замены деталей [3].

Процесс восстановления оценивается количественными показателями: интегральной и дифференциальной функциями восстановления. В соответствии с ГОСТ 27.002-2009 «Надежность в технике. Термины и определения» используются следующие характеристики: ведущая функция восстановления $\Omega(x)$ и параметр потока отказов ω(x). В этих терминах словосочетание «поток отказов (замен) отождествляется с восстановлением. По характеристикам процесса восстановления представляется возможным рассчитывать и планировать расход запасных частей на стадии эксплуатации [6].

Ежегодная потребность в запасных частях для одного типа ПТО рассчитывается с учетом возможного распределения срока замены детали. Ввиду многофакторного влияния на сроки постановки устройства в ремонт для замены детали можно считать, что наиболее обоснованным является нормальное распределение этих сроков [7].

Оптимальная стратегия управления ЗИП состоит в постепенном снижении его к концу срока эксплуатации службы с тем, чтобы по истечении срока эксплуатации на складе уже ничего не осталось [8].

Для упрощения расчета потребности в запасных частях можно за единицу продолжительности эксплуатации принимать время; расчет вести с любого времени использования автомобиля, не обязательно с начала эксплуатации; при статистических данных по группе автомобилей брать средние данные, чтобы расход все время рос, не снижался на некоторых этапах. Точность прогнозирования зависит от качества данных (достоверности измерения, их количества) [9].

В данной работе представлен метод вероятностно-статистического определения ЗИП на устройства подъемно-транспортного оборудования за нормативный срок эксплуатации (жизненный цикл - ЖЦ), а также по годичным срокам эксплуатации устройств ПТО, основанный на применении композиции нормальных законов распределения. Обработка статистических данных эксплуатации устройств портового подъемно-транспортного оборудования осуществляется без привязки к стадиям функционирования ПТО [10]. Согласно пункта 5.3.1.6 ГОСТ 27.507-2015 «Надежность в технике, запасные части, инструменты и принадлежности. Оценка и расчет запасов» количество запасных частей, входящих в комплекты ЗИП-0 и ЗИП-Г, необходимо рассчитывать на заданную наработку или срок службы изделия, где ЗИП-О - одиночный комплект ЗИП, ЗИП-Г - групповой комплект ЗИП. Пункт 5.1.4 этого же ГОСТ гласит: В настоящем стандарте рассматриваются две группы задач оценки и расчета запасов в комплектах ЗИП: по критериям достаточности и по критериям надежности. В работе рассматривается расчет запасов в комплектах ЗИП-О по показателям

надежности согласно пункта 12.2.4 ГОСТ 27.507-2015. Задача вероятностно-статистического метода определения ЗИП на устройства ПТО — дать пользователю возможность рассчитать необходимое количество ЗИП за выбранные годы или за за нормативный срок эксплуатации устройств ПТО с достаточной степенью достоверности.

Цель данной работы состоит в определении шагов, необходимых для расчета количества ЗИП на устройства ПТО как сложной системы, детали которой могут быть заменяемы в процессе технического обслуживания или в случае внезапного отказа, за годичные интервалы в пределах срока эксплуатации или за нормативный срок эксплуатации, который отражает средний срок эксплуатации объектов данного класса (7 лет).

Постановка проблемы (задачи)

Отказы и неисправности оборудования влияют на расход запасных частей к устройствам ПТО. Обработка данных об отказах и неисправностях ПТО, представляющих собой случайные величины, производится статистическими методами. Наиболее часто для описания наработок (ресурсов) деталей и агрегатов ПТО используются законы распределения: Вейбулла, нормальный, экспоненциальный, Рэлея [3, 4].

Рассмотрим механизм процесса восстановления согласно рис. 1 при условии нормального закона распределения наработки на отказ.

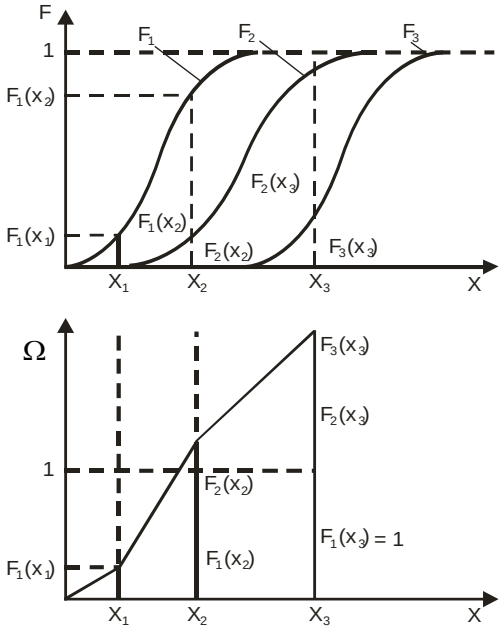


Рис. 1 - Формирование ведущей функции восстановления

Основной характеристикой процесса восстановления является функция восстановления (ведущая функция потока отказов), которая определяет накопленное количество первых и последующих отказов изделия к моменту (наработке) *x*, т.е.:

$$\Omega(x) = F_1(x) + F_2(x) + ... + F_k(x) = \sum_{k=1}^{\infty} F_k(x) \quad (1)$$

и ее дифференциальная характеристика - плотность восстановления (параметр потока отказов):

$$\omega(x) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k(x), \quad (2)$$

где $f_k(x)$ - плотность вероятности возникновения *k*-го отказа. Иными словами, $\omega(x)$ - это относительное число отказов, приходящееся на единицу времени работы одного изделия.

В общем случае параметр потока отказов непостоянен во времени, т.е. $\omega(x) \neq const$. Возможны три основных случая поведения параметра по наработке.

Первый случай - полное восстановление ресурса $\eta=1$ после каждого отказа, т.е. $\omega_1=\omega_2=\omega_3=...=\omega_k=const$.

Второй случай - неполное, но постоянное восстановление ресурса после 1-го отказа, т.е. $\eta_j=const<1$. Для этого случая также характерна стабилизация параметра потока отказов, но на более высоком уровне: $\omega_1=\omega_2=\omega_3=...=\omega_j=const$, $\omega_j>\omega_k$.

Третий случай - последовательное снижение полноты восстановления ресурса, т.е. $\eta_m \neq const$; $1>\eta_1>\eta_2>\ldots>\eta_m$. В этом случае параметр потока отказов непрерывно увеличивается, т.е. $\omega_m>\omega_{m-1}>\omega_{m-2}>...>\omega_1$.

Однако при расчетах можно принимать $\omega(x) \approx const$ как среднюю для всех трех случаев.

Анализу и расчету потоков отказов, представляющих сумму независимых неотрицательных случайных величин, посвящен один из разделов теории вероятностей - теория восстановления [11, 12].

Ведущая функция потока отказов $\Omega(x)$ является важнейшей количественной характеристикой, необходимой для прогнозирования и планирования потребности в запасных частях и материалах в реальных условиях эксплуатации устройств ПТО [6].

Для практического расчета ведущей функции потока отказов $\Omega(X)$ необходимо собрать данные о

вероятности первого, второго и т.д. отказов и просуммировать их.

В общем виде $\Omega(x)$ определяется с помощью композиций нормальных законов распределения, вывод которых рассмотрим на примере простого процесса восстановления. Рассмотрим определение в общем виде $\Omega(x)$ на примере простого процесса восстановления с использованием нормального закона [3, 4, 5, 13]:

$$\Omega(t)=\sum_{k=1}^{\infty}F_k(t)=\sum_{k=1}^{\infty}\Phi\left(\frac{t-\eta\mu_k}{\sigma_k}\right), \quad (3)$$

где Φ - нормированная функция для: $z=\frac{t-\eta\mu_k}{\sigma_k}$,

где k - число замен или отказов (число композиций нормальных законов); η - коэффициент полноты восстановления ресурса; μ_k – математическое ожидание k – ой композиции, а σ_k – среднее квадратическое отклонение k – ой композиции: $\mu_k=k\cdot\mu$, $\sigma_k=\sigma\cdot\sqrt{k}$, т. к. $\sigma_k=\sqrt{D}$.

Математическое ожидание отказа (замены) μ и среднее квадратическое отклонение σ вычисляются за один год эксплуатации согласно формул (4) и (5):

$$\mu=\frac{\sum_{i=1}^{m}t_i\cdot n_i}{n}, \quad (4)$$

$$D(t)=\frac{\sum_{i=1}^{m}(t_i-\mu)^2 n_i}{n},\sigma=\sqrt{D(t)}, \quad (5)$$

где m – число месяцев (интервалов); t_i - середина интервала (месяца); n_i - количество отказов элементов помесячно в течение года; n – общее количество отказов.

Среднее квадратическое отклонение композиции σ_k определяется через дисперсию по формуле:

$$D=\sigma_1^2+\sigma_2^2+\ldots+\sigma_k^2=k\cdot\sigma^2,\ \sigma_k=\sqrt{D}\ \text{ или }\ \sigma_k=\sigma\cdot\sqrt{k}. \quad (6)$$

Значения μ и σ определяются по данным таблицы отказов устройств за один год эксплуатации, придерживаясь гипотезы, что обоснованным является нормальное распределение этих отказов [7, 10]. Для практического расчета $\Omega(X)$ необходимо воспользоваться формулой (3), т.е. собрать данные о вероятности первого, второго и т.д. отказов и просуммировать их.

Основываясь на полученных показателях надежности, представляется возможным определить потребность в запасных частях на различных интервалах периодичности работы устройств ПТО.

Материалы и методы

В эксплуатационных условиях на каждое ПТО ведется журнал ремонта, в котором отражаются время наступления отказа, причина отказа, дата и время начала и окончания ремонта. В таблице 1 представлена статистическая информация об отказах гидравлической системы шести автопогрузчиков одного типа «Тойота» 7FDA50 за двенадцать месяцев 2025 г. Для определения математического ожидания отказа и среднего квадратического отклонения воспользуемся данными журнала ремонта ПТО за определенный период времени (таблица 1), т.к. характеристики надежности элементов изделия можно определять статистически по результатам эксплуатации. Распределение случайных величин отказов элементов гидравлической системы подчиняется нормальному закону распределения, что проверено критерием Пирсона (хи-квадрат) [10].

Таким образом, вначале по экспериментальным данным устанавливают закономерности распределения наработки элемента между отказами (заменами). Затем, используя математическую модель соответствующего процесса восстановления и алгоритм, рассчитывают ведущую функцию $\Omega(t)$. В дальнейшем ведущую функцию распределения применяют для всех идентичных элементов, эксплуатируемых в схожих условиях. В случае изменения конструкции элемента, применения других материалов при его изготовлении, изменения условий эксплуатации, т. е. изменения факторов, существенно влияющих на условия обеспечения надежности и эффективности ТС, необходимо провести уточнение ее достоверности.

По данным таблицы 1 определяется μ - математическое ожидание отказа за один год эксплуатации:

$$\mu=\frac{\sum_{i=1}^{m}t_i\cdot n_i}{n}=\frac{1\quad 0{,}5+1\quad 4{,}5+1\quad 9{,}5+1\quad 10{,}5=1\quad 11{,}5}{5}=7{,}3. \quad (7)$$

Определяется дисперсия $D(x)$ и среднее квадратическое отклонение σ согласно формулы (5):

$$D(t)=\frac{\sum_{i=1}^{m}(t_i-\mu)^2 n_i}{n}=\frac{86{,}8}{5}=17{,}36\,;\sigma=\sqrt{17{,}36}=4{,}17. \quad (8)$$

Вычисленные значения μ и σ будут использованы при расчете ведущей функции потока отказов $\Omega(t)$ за интервалы (годы) и нормативный срок эксплуатации, так как ведущая функции потока отказов определяет накопленное количество 1-х и последующих отказов изделия к наработке, например, t = 84 месяца. В каждом интервале наработки (1-год) значения μ и σ для этих интервалов определяются с помощью композиции нормальных законов распределения [14, 15], т.е.:

$$\mu_k=k\cdot\mu,\ D=\sigma_1^2+\sigma_2^2+\ldots+\sigma_k^2,\ \sigma_k=\sqrt{D}\ \text{или}\ \sigma_k=\sigma\cdot\sqrt{k}, \quad (9)$$

где μ_k – математическое ожидание k – ой композиции, а σ_k – среднее квадратическое отклонение k – ой композиции.

Таблица 1

Сводная таблица отказов гидравлической системы шести автопогрузчиков «Тойота» 7FDA50N за двенадцать месяцев 2025 г.

№ п/п	Месяцы эксплуатации	Число отказов, n_i	Середина интервала (месяца), t_i	$t_i \cdot n_i$	$(t_i-\mu)^2 \cdot n_i$	Вычисление $\Omega(84)$, $\mu=7,3$, $\sigma=4,17$, $\eta=1,0$	Вычисление $\Omega(84)$, $\mu=7,3$, $\sigma=4,17$, $\eta=0,7$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Январь	1	0,5	0,5	46,24	$\Omega_{\eta=1}(84) = F_1(z_1)+ F_2(z_2)+ F_3(z_3)+\ldots+ F_{12}(z_{12})$	$\Omega_{\eta=0,7}(84) = F_1(z_1)+ F_2(z_2)+ F_3(z_3)+\ldots+ F_{23}(z_{23})$
2	Февраль	-	1,5	0	-		
3	Март	-	2,5	0	-		
4	Апрель	-	3,5	0	-		
5	Май	1	4,5	4,5	7,84		
6	Июнь	-	5,5	0	-		
7	Июль	-	6,5	0	-		
8	Август	-	7,5	0	-		
9	Сентябрь	-	8,5	0	-		
10	Октябрь	1	9,5	9,5	4,84		
11	Ноябрь	1	10,5	10,5	10,24		
12	Декабрь	1	11,5	11,5	17,64		
Итого:		$n=\sum n_i=5$		$\sum=36,5$	$\sum=86,8$	$\Omega_{\eta=1}(84)=10,27$	$\Omega_{\eta=0,7}(84)=16,18$

Результаты

Так как нормативный срок равен 84 месяцам, то для расчета $\Omega(84)$ используем формулу (3) последовательно определяя F_1, F_2, F_3 и т.д. до тех пор пока F_k не будут малы: $\Omega(84) = F_1(84)+F_2(84)+ F_3(84)+\ldots$ Просуммированные вероятности первого, второго и т.д. отказов занесем в графы 7 и 8 таблицы 1 согласно значениям η - коэффициента полноты восстановления ресурса.

Рассчитаем $\Omega(84)$ при $\eta=1,0$, $\mu=7,3$ и $\sigma=4,17$. Для расчетов используем формулу (3), последовательно определяя:
$F_1(84)=\Phi((84-1\cdot7,3)/(4,17\cdot\sqrt{1})=\Phi(18,39)=1;$
$F_2(84)=\Phi((84-2\cdot7,3)/(4,17\cdot\sqrt{2})=\Phi(11,77)=1;$ *далее* $F_3(84)=1;$ $F_4(84)=1;$ $F_5(84)=1;$ $F_6(84)=1;$ $F_7(84)=0,99;$ $F_8(84)=0,98;$ $F_9(84)=0,91;$ $F_{10}(84)=0,80;$ $F_{11}(84)=0,58;$ $F_{12}(84)=0,006.$ Ввиду того, что $F_{12}(84)$ мало, последующие расчеты для $F_{13}(84)$ и других можно не производить. Таким образом, за нормативный срок службы возможное накопленное число замен рассматриваемой детали на одно устройство ПТМ составит:

$$\Omega_{\eta=1}(84)=F_1(z_1)+ F_2(z_2)+ F_3(z_3)+\ldots+ F_{12}(z_{12})=10,27. \quad (10)$$

Вычисленное значение $\Omega(84)$ при $\eta=1$, $\mu=7,3$ и $\sigma=4,17$ занесено в графу 7 таблицы 1.

Теперь рассчитаем $\Omega(84)$ при $\eta=0,7$, $\mu=7,3$ и $\sigma=4,17$. Для расчетов используем формулу (3), последовательно определяя:
$F_1(84)=\Phi((84-1\cdot7,3\cdot0,7)/(4,17\cdot\sqrt{1})=\Phi(18,92)=1;$
$F_2(84)=\Phi((84-2\cdot7,3\cdot0,7)/(4,17\cdot\sqrt{2})=\Phi(12,51)=1;$ *далее* $F_3(84)=1;$ $F_4(84)=1;$ $F_5(84)=1;$ $F_6(84)=1;$ $F_7(84)=1;$ $F_8(84)=0,99;$ $F_9(84)=0,99;$ $F_{10}(84)=0,99;$ $F_{11}(84)=0,97;$ $F_{12}(84)=0,94;$ $F_{13}(84)=0,88;$ $F_{14}(84)=0,78;$ $F_{15}(84)=0,69;$ $F_{16}(84)=0,54;$ $F_{17}(84)=0,45;$ $F_{18}(84)=0,33;$ $F_{19}(84)=0,24;$ $F_{20}(84)=0,15;$ $F_{21}(84)=0,11;$ $F_{22}(84)=0,06;$ $F_{23}(84)=0,04.$ Ввиду того, что $F_{23}(84)$ мало, последующие расчеты для $F_{24}(84)$ и других можно не производить. Таким образом, за нормативный срок службы возможное накопленное число замен рассматриваемой детали на одно устройство ПТМ составит:

$$\Omega_{\eta=0,7}(84) =F_1(z_1)+ F_2(z_2)+\ldots+ F_{23}(z_{12})=16,18. \quad (11)$$

Значение $\Omega_{\eta=0,7}(84)=16,18$ занесем в графу 8 таблицы 1.

Самое большое значение ведущая функции потока отказов достигает, когда коэффициент восстановления ресурса принимает значение η=0,7. Таким образом, возможное число замен за жизненный цикл устройств ПТО при η=0,7 составляет Ω=16,18 или округляя до целого значения можно взять Ω=16 запасных частей за весь нормативный срок эксплуатации. Если взять, что η=1,0, то возможное число замен детали гидравлической системы за жизненный цикл составит Ω=10.

Таким образом, возможное число замен деталей гидравлической системы Ω=10 при η=1,0 и Ω=16 при η=0,7 за жизненный цикл устройства ПТО согласно вычислениям по формулам (10 и 11) в зависимости от η - коэффициента полноты восстановления ресурса, соответственно равного 1,0 или 0,7. В соответствии с пунктом 5.1.4 ГОСТ 27.507-2015 - задача вероятностно-статистического метода определения ЗИП на устройства ПТО — дать пользователю возможность рассчитать необходимое количество ЗИП за годичные интервалы и нормативный срок эксплуатации устройств ПТО с достаточной степенью достоверности.

Расход запчастей возрастает также при сокращении ресурса деталей при последующих заменах, т. е. уменьшении η. Если в устройствах ПТО применяются несколько одинаковых деталей или узлов, то норма соответственно увеличивается. Таким образом, для определения норм расхода запчастей необходимы сведения по надежности деталей, интенсивности эксплуатации и сроку службы устройств ПТО до списания [16].

Так как значения μ и σ определялись за 12 месяцев эксплуатации устройств ПТО, то возможно по данной методике определять необходимое количество ЗИП по срокам эксплуатации устройств ПТО кратным 1 году. Например, рассмотрим определение количества ЗИП за 24 месяца эксплуатации. Рассчитаем $\Omega(24)$ при η=1,0, μ=7,3 и

σ=4,17. Для расчетов используем формулу (3), последовательно определяя:
$F_1(24)=\Phi((24-1\cdot7,3\cdot0,7)/(4,17\cdot\sqrt{1})=\Phi(4,53)=1;$
$F_2(24)=\Phi((24-2\cdot7,3\cdot0,7)/(4,17\cdot\sqrt{2})=\Phi(2,34)=0,99;$ *далее* $F_3(24)=0,88;\ F_4(24)=0,66;\ F_5(24)=0,43;\ F_6(24)=0,26;\ F_7(24)=0,14;\ F_8(24)=0,08.$ Ввиду того, что $F_8(24)$ мало, последующие расчеты для $F_9(24)$ и других можно не производить. Имеем:

$$\Omega_{\eta=1}(24)=F_1(z_1)+F_2(z_2)+F_3(z_3)+\ldots+F_8(z_{12})=4,44.$$

Таким образом, за срок службы равное 24 месяца возможное накопленное число замен рассматриваемой детали на одно устройство ПТМ составит $\Omega_{\eta=1}(24)=4,44$ при $\eta=1,0$.

В таблице 2 приведены последовательности шагов для определения необходимого количества ЗИП на устройства ПТО за годичные интервалы в пределах срока эксплуатации или за нормативный срок эксплуатации.

Таблица 2

Шаги для определения необходимого количества ЗИП на устройства ПТО за годичные интервалы в пределах срока эксплуатации или за нормативный срок эксплуатации.

№ шагов	Производимые мероприятия
1	Согласно исходных данных эксплуатации группы конкретных типов ПТО за один год эксплуатации, определяется математическое ожидание μ и среднее квадратическое отклонение σ, придерживаясь гипотезы, что распределение случайных величин 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	Задаемся величиной η (коэффициента полноты восстановления ресурса). Для определения ведущей функции отказов $\Omega(X)$ используется композиция нормальных законов распределений согласно формулы (3).
4	На основании вычисленных значений $\Omega(X)$ определяется необходимое количество ЗИП на устройства ПТО за выбранные годичные интервалы в пределах срока эксплуатации или за нормативный срок эксплуатации.

Задача оценки состояния приборов и формирования резерва запасных частей для оперативного поддержания их работоспособности имеет актуальное значение, особенно для организации работы предприятия, на котором имеется ряд однотипных приборов. Это обусловлено необходимостью оптимизации затрат и создания запасов для обеспечения бесперебойности эксплуатационных и ремонтных процессов [17].

Разработанный вероятностно-статистический метод может применяться для расчета необходимого количества ЗИП на устройства ПТО за годичные интервалы в пределах срока эксплуатации, а также за ЖЦ. Пункт 5.10 ГОСТ Р 55.0.05-2016 гласит, что любые математические и статистические формулы, используемые при формировании информации для принятия решений по выбору метода управления активами, должны быть логически обоснованными и доступными владельцам или пользователям активов и одобрены ими.

Заключение

В работе рассмотрен вероятностно-статистический метод определения количества запасных частей на устройства ПТО за годичные интервалы в пределах срока эксплуатации или за нормативный срок эксплуатации.

При расчете ведущей функции потока отказов можно воспользоваться формулой (3), учитывающий композицию нормальных законов распределения за годичные интервалы в пределах срока эксплуатации или за нормативный срок эксплуатации устройств ПТО.

Для получения информации для определения количества запасных частей для различных типов устройств ПТО целесообразно формировать базу статистических данных отказов деталей устройств ПТО. Таким образом, имея систематизированные данные по отказам деталей устройств ПТО, можно прогнозировать потребности в ЗИП.

Литература

1. Глущенко А.А. Техническая эксплуатация автомобиля. - Учебное пособие. Ульяновск: УлГУ, 2019. с. 232
2. Антонов А.В., Чепурко В.А. К вопросу расчета состава запасных элементов, имеющих отказы двух типов. Журнал Надежность, том 22, №3, 2022.
3. Лукинский В.С., Зайцев Е.И. Прогнозирование надежности автомобилей. – Ленинград: Политехника, 1991. с. 224
4. Кузнецов Е.С. Техническая эксплуатация автомобилей. - Учебник для вузов, 4-е издание, переработанное и дополненное/ Е.С. Кузнецов, А.П. Болдин, В.М. Власов и др. – М.: Наука, 2001. с. 535
5. Захаров Н.С. Сервис транспортных, технологических машин и оборудования в нефтегазодобыче. - Учебное пособие / Н.С. Захаров, А.И. Яговкин, С.А. Асеев и др**.** Под редакцией Н.С. Захарова. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. с.199
6. Булгаков Н.Ф., Махова Е.Г., Коваленко В.В., Шалимов С.Н. Основы теории надежности и диагностики: учеб.-метод. пособие [Электронный ресурс] /сост. Н. Ф. Булгаков, Е. Г. Махова, В. В. Коваленко, С. Н. Шалимов. – Электрон. дан. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013.
7. Невзоров В.Н., Сугак Е.В. Надежность машин и оборудования. Ч.2. Проектирование, эксплуатация, экспериментальные исследования: Учеб. пособие для студентов технических специальностей вузов / Под общ. Ред. Сугака Е.В. – Красноярск: Сибирский государственный технологический университет, 1998. с. 264
8. Чепурко В.А., Унщиков А.П. Исследование динамических моделей управления запасами на предприятии // Надежность. 2010. № 3. с. 40-47.

9. Авдонькин Ф, Н. Теоретические основы технической эксплуатации автомобилей: Учеб. пособие для вузов.- М.: Транспорт, 1985. с. 215
10. 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
11. Гнеденко В. Б., Беляев Ю. К., Соловьев А, Д. Математические методы в теории надежности. - М.: Наука, 1965. с. 524
12. Кокс Д., Смит В. Теория восстановления. М.: Советское радио, 1967.
13. Индикт Е.А., Кривенко В.А., Черняйкин В.А. К вопросу о надежности автомобильных конструкций. - журнал «Автомобильная промышленность», № 11, 1968, с.19-22
14. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для вузов. – 6-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 1999. с. 576.
15. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. – Учебник, 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2009. с.551
16. Исаенко П.В. Основы работоспособности технических систем: в 2 ч. [Текст]: учебное пособие с грифом УМО /П.В. Исаенко, А.В. Исаенко. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. с. 324
17. Херсонский Н.С., Большедворская Л.Г. Определение необходимого количества запасных частей для поддержания работоспособности приборов. - Международный информационно-аналитический журнал «Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык». № 3 (38). Сентябрь 2023 (http://ce.if-mstuca.ru). УДК 347.823.21 DOI 10.51955/2312-1327_2023_3_6

References

1. Glushchenko A.A. Tekhnicheskaya ekspluataciya avtomobilya. [Technical operation of the car]. - Uchebnoe posobie. Ul'yanovsk: UlGU, 2019. s. 232
2. Antonov A.V., Chepurko V.A. K voprosu rascheta sostava zapasnyh elementov, imeyushchih otkazy dvuh tipov. [To the issue of calculating the composition of spare elements that have two types of failures]. Zhurnal Nadezhnost', tom 22, №3, 2022.
3. Lukinskij V.S., Zajcev E.I. Prognozirovanie nadezhnosti avtomobilej. [Predicting car reliability]. – Leningrad: Politekhnika, 1991. 224 s.
4. Kuznecov E.S. Tekhnicheskaya ekspluataciya avtomobilej. [Technical operation of cars].- Uchebnik dlya vuzov, 4-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe/ E.S. Kuznecov, A.P. Boldin, V.M. Vlasov i dr. – M.: Nauka, 2001. s. 535
5. Zaharov N.S. Servis transportnyh, tekhnologicheskih mashin i oborudovaniya v neftegazodobyche. [Service of transport and technological machines and equipment in oil and gas production].- Uchebnoe posobie / N.S. Zaharov, A.I. Yagovkin, S.A. Aseev i dr. Pod redakciej N.S. Zaharova. – Tyumen': TyumGNGU, 2011. s.199
6. Bulgakov N.F., Mahova E.G., Kovalenko V.V., Shalimov S.N. Osnovy teorii nadezhnosti i diagnostiki [Fundamentals of reliability theory and diagnostics]: - ucheb.-metod. posobie [Elektronnyj resurs] /sost. N. F. Bulgakov, E. G. Mahova, V. V. Kovalenko, S. N. Shalimov. – Elektron. dan. – Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2013.
7. Nevzorov V.N., Sugak E.V. Nadezhnost' mashin i oborudovaniya. Ch.2. Proektirovanie, ekspluataciya, eksperimental'nye issledovaniya [Reliability of Machines and Equipment. Part 2. Design, Operation, and Experimental Research]: Ucheb. posobie dlya studentov tekhnicheskih special'nostej vuzov / Pod obshch. Red. Sugaka E.V. – Krasnoyarsk: Sibirskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet, 1998. s. 264
8. Chepurko V.A., Unshchikov A.P. Issledovanie dinamicheskih modelej upravleniya zapasami na predpriyatii [Research on dynamic inventory management models at an enterprise] // Nadezhnost'. 2010. № 3. s. 40-47.
9. Avdon'kin F, N. Teoreticheskie osnovy tekhnicheskoj ekspluatacii avtomobilej [Theoretical foundations of technical operation of cars]: Ucheb. posobie dlya vuzov.-M.: Transport, 1985. s. 215
10. Ablyazov E.K., Ablyazov K.A. Ocenka pokazatelej nadezhnosti odnotipnyh portovyh peregruzochnyh mashin s uchetom ordinarnosti i odnorodnosti potoka otkazov v ekspluatacionnyh usloviyah. [Evaluation of the reliability indicators of similar port handling machines, taking into account the ordinariness and homogeneity of the failure rate under operational conditions]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2023. №4 chast' 1, s. 232-241. DOI: 10.37220/MIT. 2023.62.4.028
11. Gnedenko V. B., Belyaev Yu. K., Solov'ev A, D. Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti. [Mathematical methods in reliability theory]. - M.: Nauka, 1965. s. 524
12. Koks D., Smit V. Teoriya vosstanovleniya. [Theory of recovery]. M.: Sovetskoe radio, 1967.
13. Indikt E.A., Krivenko V.A., Chernyajkin V.A. K voprosu o nadezhnosti avtomobil'nyh konstrukcij. [On the issue of reliability of automobile structures] - zhurnal «Avtomobil'naya promyshlennost'», № 11, 1968, s.19-22
14. Ventcel' E.S. Teoriya veroyatnostej [Probability theory]: uchebnik dlya vuzov. – 6-e izd., ster. – M.: Vysshaya shkola, 1999. s.576.
15. Kremer N.Sh. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika. [Probability theory and mathematical statistics]. – Uchebnik, 3-e izd., pererab. i dop. – M.:YuNITI-DANA, 2009. s.551
16. Isaenko P.V. Osnovy rabotosposobnosti tekhnicheskih sistem: v 2 ch. [Fundamentals of Technical System Performance: In 2 Parts]. [Tekst]: uchebnoe posobie s grifom UMO /P.V. Isaenko, A.V. Isaenko. – Tomsk: Izd-vo Tom. gos. arhit.-stroit. un-ta, 2014. s. 324
17. Hersonskij N.S., Bol'shedvorskaya L.G. Opredelenie neobhodimogo kolichestva zapasnyh chastej dlya podderzhaniya rabotosposobnosti priborov. [Determining the required number of spare parts to maintain the devices' functionality]. - Mezhdunarodnyj informacionno-analiticheskij zhurnal «Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovanie, yazyk». № 3 (38). Sentyabr' 2023 (http://ce.if-mstuca.ru). UDK 347.823.21 DOI 10.51955/2312-1327_2023_3_6

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

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 03.06.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.06.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 22.60.2026.

Научная статья
УДК 531.391.1:532.5.011
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.048

Исследование нелинейных временных рядов судовой автоматической идентификационной системы

Астреин В.В.[1] Astrein-vadim@rambler.ru**, Кондратьев С.И.**[1] zur_mga@nsma.ru**,**
Астреина Л.Б.[1] astreina-ludmila@gmail.com**, Филатов В.И.**[1] Filatov_viktor1994@mail.ru
[1]Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. Проблемы недостаточности существующих методов исследования временных рядов Автоматической идентификационной системы (АИС), как теоретических, так и численных для обработки и прогнозирования движения судна-цели актуальны особенно в настоящее время при разработке Морских автономных судов. Данные судовой АИС в реальном времени характеризуются неравномерной дискретизацией, пропусками и шумами, что делает их непригодными для прямого применения методов машинного обучения без предварительной подготовки. В связи с этим целесообразно разделить процесс на ресурсоемкий этап обучения на исторических данных (offline) и легковесный этап инференса - процесса, при котором нейросеть обрабатывает входные данные и генерирует ответ, используя уже обученные параметры. Непосредственное применение методов машинного обучения к потоковым данным АИС сопряжено с рядом трудностей, включая высокую вычислительную нагрузку, зашумленность сигналов и неравномерность временных рядов. В статье акцент делается на первом этапе обработки информации АИС (offline), где производится глубокий статистический анализ исторических массивов данных АИС, строится уравнение движения судна-цели, соответствующего выборочным (эмпирическим) данным. Предварительное офлайн-обучение на репрезентативных исторических данных позволяет обеспечить высокую точность и вычислительную эффективность прогнозов в реальном времени, а также решить проблему нестационарности процессов за счет периодического дообучения моделей по мере накопления новых данных. Результаты исследования будут востребованы для идентификации кинематической модели движения судна, повышения ее точности, для расследования инцидентов (столкновения, посадки на мель, нарушения Международных Правил Предупреждения столкновений судов в море, 1972), для повышения эффективности оценки работы алгоритмов онлайн сопровождения и предупреждения столкновений, обогащения базы данных для обучения нейросетевых моделей, распознавания классов целей или измерений.

Ключевые слова: автономное морское судно, нелинейная динамика движения, временные ряды, автоматическая система идентификации, обработка информации, оффлайн и онлайн-режимы, выбор наилучшей модели.
Для цитирования: Астреин В.В., Кондратьев С.И., Астреина Л.Б., Филатов В.И. Исследование нелинейных временных рядов судовой автоматической идентификационной системы. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 203—212. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.048

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.048

Research of nonlinear time series of ship's automatic identification system

Vadim V. Astrein[1]Astrein-vadim@rambler.ru**, Sergey I. Kondratiev**[1] zur_mga@nsma.ru,
Ludmila B. Astreina[1] astreina-ludmila@gmail.com.**, Viktor I. Filatov**[1]: Filatov_viktor1994@mail.ru.
[1]Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. The inadequacy of existing methods for studying Automatic Identification System (AIS) time series, both theoretical and numerical, for processing and predicting target vessel motion is particularly relevant today in the development of autonomous marine vessels. Real-time ship Automatic Identification System (AIS) data is characterized by uneven sampling, gaps, and noise, making it unsuitable for direct application of machine learning methods without prior training. Therefore, it is advisable to separate the process into a resource-intensive training stage using historical data (offline) and a lightweight inference stage—a process in which a neural network processes input data and generates a response using already trained parameters. Direct application of machine learning methods to streaming AIS data is associated with a number of challenges, including high computational load, signal noise, and uneven time series. This article focuses on the first stage of AIS data processing (offline), which involves a thorough statistical analysis of historical AIS datasets and the construction of a target vessel's motion equation based on sample (empirical) data. Preliminary offline training using representative historical data ensures high accuracy and computational efficiency of real-time forecasts and addresses the problem of process non-stationarity through periodic retraining of models as new data accumulates. The research results will be useful for identifying the kinematic model of vessel motion, improving its accuracy, investigating incidents (collisions, groundings, violations of the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972), improving the performance of online tracking and collision avoidance algorithms, enriching the database for training neural network models, and recognizing target classes or measurements.

© Астреин В.В., Кондратьев С.И., Астреина Л.Б., Филатов В.И. 2026

Keywords: autonomous marine vessel, nonlinear motion dynamics, time series, automatic identification system, information processing, offline and online modes, selection of the best model.
For citation: Vadim V. Astrein, Sergey I. Kondratiev, Liudmila B. Astreina, Viktor I. Filatov, Research of nonlinear time series of ship's automatic identification system, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 203—212. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.048

Введение

В соответствии с требованиями Главы 5 «Навигационная безопасность» Конвенции по охране человеческой жизни на море (СОЛАС), принятой Резолюцией ИМО MSC.99(73) от 5 декабря 2000 г. [1], начиная с 1 июля 2002 г. на всех вновь построенных судах требуется устанавливать принципиально новое навигационное оборудование – Автоматическую идентификационную систему (АИС). Одной из причин появления АИС явились имеющиеся ограничения судовых Радиолокационных станций с функцией автоматической радиопрокладки (РЛС/САРП) для решения задач сопровождения и предупреждения столкновений судов. Сейчас главное назначение АИС – опознавание. Поэтому АИС используется, как дополнительное техническое средство получения информации при решении задач опасного сближения с другими судами. В тоже время явные преимущества информации АИС по точности и надежности динамической информации перед РЛС/САРП, рассмотренные в [2, 3, 4], практически не используются. В последнее время АИС называют не идентификационной, а информационной системой и это не случайно, так как объем предоставляемой динамической информации АИС вполне достаточен не только для целей идентификации, но и для целей принятия решений.

В литературе имеется достаточно большое количество исследований с использованием временных рядов АИС (ВР АИС), например: [5-12], в которых исследователей в основном интересуют исторические треки судов-целей с возможностью идентификации и планирования потоков судов за достаточно длительный период наблюдений (за вахту, за сутки, за рейс). Для анализа треков по ВР АИС выбираются длинные ВР, сглаживаются, оцениваются прошлые состояния в режиме оффлайн, в результате чего получаются практически линейные или плавные траектории, которые, как правило удовлетворяют целям исследователей. В тоже время практически отсутствует информация об обработке динамической информации АИС в режиме реального времени (онлайн), когда интеллектуальная Система поддержки принятия решений, предназначенная для сопровождения/предупреждения столкновений должна выдавать текущее состояние судна-цели и давать прогноз в реальный момент времени, используя только текущие и прошлые данные АИС. Для решения задачи прогнозирования в реальном времени, прежде всего необходимо вначале получить инструмент оффлайн анализа ВР АИС для последующего, более точного анализа динамической информации АИС, а затем результаты такого исследования применять для прогнозирования движения судна-цели в реальном времени.

Исследование динамики нелинейных ВР АИС судна-цели в данной статье рассматривается методами регрессионного анализа. Основные цели исследования прежде всего предназначены для создания:

- Систем поддержки принятия решений (СППР) для судоводителей и береговых диспетчеров с целью анализа нелинейной динамики движения судна-цели (временных рядов координат, курса, скорости), построения моделей для оценки риска столкновения, особенно в районах с интенсивным движением,
- Интеллектуальных систем управления судном с целью разработки адаптивных и нейросетевых систем управления, что позволяет идентифицировать судно (как объект управления) для разработки авторулевого, способного оптимально работать в меняющихся условиях (волнение, ветер, течение).

Исследования нелинейной динамики движения судов-целей на практике показали, что процесс получения информации осложняется аномалиями, неравномерностью ВР. В исследовании [3] показано, что стандарты выдачи динамической информации GPS и АИС на коротких временных интервалах в различных районах мирового океана при различных скоростях судов и использованием различных моделей приемных устройств GPS и АИС зачастую не отвечают требованиям [13,14]. В более чем сотни наблюдений за динамикой движения судов-целей были получены результаты выдачи параметров GPS и АИС. Эти результаты наблюдений были сопоставлены со стандартами [13,14]. В результате сравнения натурных и теоретических исследований было выявлено, что полученные параметры GPS и АИС:

- не соответствует (на нелинейных участках движения),
- частично не соответствует, или полностью соответствует (на линейных участках движения) принятым моделям получения динамической информации по стандартам [13,14].

Исследование динамики нелинейных ВР АИС, выполненное методами регрессионного анализа, в отличие от исторических треков, превращает сырые данные о движении судов-целей в ценную информацию как на текущие операционные задачи (сопровождение, предупреждение столкновений), так и на долгосрочные стратегические цели. А значит, результаты исследования будут востребованы на МАНС, где требуется особая точность моделей движения судна-цели (швартовка к причалу, сближения вплотную ship to ship, проводка в узкостях и фьордах), наблюдения за потоками судов в Системах разделения и управления движением судов.

С другой стороны анализ динамики нелинейных ВР АИС за счет использования АИС в качестве основного источника информации и РЛС/САРП как второстепенного, позволяет решать проблему точности, надежности и бесперебойности получения информации методами реконфигурации модели мониторинга СППР, резервирования и слияния

данных (фьюжн) за счет избыточности средств наблюдений за судами-целями.

Методы и Материалы (Methods and Materials)

Задача оценки динамики движения судна-цели может рассматриваться как в режиме онлайн, так и оффлайн с прогнозированием и без него. В математике, статистике и обработке сигналов имеется существенное различие, связанное с моментом времени, для которого делается оценка. Рассматривая движение или сопровождение судна-цели могут использоваться методы «фильтрации» – оценки текущего состояния судна, когда используются данные до текущего момента включительно (онлайн) и методы «сглаживания» – оценки прошлых состояний судна за весь период наблюдений (оффлайн).

Оффлайн оценка движения судна-цели производится с целью получения максимально точного исследования работы АИС в различных режимах движения судна-цели на линейных и нелинейных участках движения. Суть оценки динамики нелинейного движения судна-цели заключается в том, чтобы, используя нестационарные, неэквидистантные, короткие ВР АИС, построить математические модели, которые описывают и предсказывают движение судна не как линейную систему, а как сложный нелинейный процесс, зависящий от множества взаимосвязанных факторов. Задача регрессионного анализа, в этом случае, заключается в нахождении уравнения движения судна-цели, которая связывает параметры управления/состояния и внешние условия с параметрами движения.

Процесс динамики движения судна-цели является многопараметрическим процессом наблюдения за одномерными ВР АИС, которые используются как исходные данные для определения числовых характеристик тенденций изменения движения судна-цели. Информационный портрет параметров движения судна-цели с механическим двигателем ($I_{\text{судно−цель}}$) описывается кортежем:

$$I_{\text{судно−цель}} = \langle \varphi_{\text{ц}}, \lambda_{\text{ц}}, K_{\text{ц}}, V_{\text{ц}}, \omega_{\text{ц}}, t \rangle,$$

где $\varphi_{\text{ц}}, \lambda_{\text{ц}}$ - координаты; $K_{\text{ц}}, V_{\text{ц}}$ – курс и скорость; $\omega_{\text{ц}}$ – угловая скорость; t -время.

Задача построения качественного уравнения движения (регрессии), соответствующего выборочным (эмпирическим) данным и целям исследования, является достаточно сложным и многоступенчатым процессом. Его можно разбить на три этапа:

1) определение параметров уравнения движения судна-цели;
2) вывод формулы уравнения регрессии;
3) анализ качества уравнения и проверка адекватности уравнения эмпирических данных, совершенствование уравнения.

Так как динамическая информация о движении судна-цели АИС поступает с погрешностями, полученные параметры имеют определенный разброс, сглаживаются и обрабатываются по способу наименьших квадратов (МНК). По результатам сглаживания рассчитывается наиболее вероятная траектория движения судна-цели, оцениваются курс и скорость движения по этой траектории.

Результаты (Results)

Определим параметры уравнения движения судна-цели на примере выборки таблицы 1, полученной по наблюдениям за судном – целью при подходе на якорное место в Сингапурском проливе. Такой пример выбран неслучайно. Интерес вызывает алгоритм расчёта уравнения движения судна-цели и его оценки при ненадежной работе АИС в режимах маневрирования как курсом, так и скоростью. В исследовании [3] показано, что подход и постановка судна на якорь может сопровождаться аномальными значениями ВР АИС, природа которых детально описана в [2, 3]. Дискретность данных, полученных по АИС, в наблюдениях описывалась неравномерными (неэквидистантными) ВР АИС, когда:

$$\Delta t_0 = t_{i+1} - t_i = random,$$

где: Δt_0 – интервал между получением дискретных данных АИС;

t_{i+1} - $(i+1)$ – момент времени;

t_i - (i) – тый момент времени t;

на коротком интервале наблюдений $[\Delta t_i]$. В рассматриваемом примере наблюдение ВР АИС осуществлялось за период с 01:03 до 09:53 и состояли из n = 54 измерений. Покажем выборку (чтобы избежать громоздких табличных и вычислительных данных) - лишь первые 10 и последние 5 измерений широты $(\varphi_{\text{ц}})$ и долготы $(\lambda_{\text{ц}})$. Переведем географические широты и долготы $(\varphi_{\text{ц}}, \lambda_{\text{ц}})$ в плоские прямоугольные координаты Гаусса-Крюгера и запишем их значения через (x, y) последними переменными их значения в таблице 1.

Таблица 1

Таблица ВР АИС широт $\varphi_{\text{п}}$ и долгот $\lambda_{\text{п}}$

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	…	50	51	52	53	54
x	913	916	918	919	922	926	928	931	933	940	…	1069	1075	1080	1082	1088
y	725	680	606	651	629	606	592	588	554	517	…	89	87	85	84	82

Выведем формулу уравнения регрессии.

Известно, что описать статистический ряд за $[\Delta t_i]$ можно, если описать статистические временные ряды используя следующие функции: полиномиальную линейную, параболическую, показательную, экспоненциальную, степенную, гиперболическую. Покажем более подробно алгоритм расчета в соответствии с [16-17] кубической регрессии, используя ВР АИС из таблицы 1, для чего будем использовать МНК и регрессионный анализ,

позволяющие найти уравнения кубической регрессии движения судна-цели: $\hat{y} = ax^3 + bx^2 + cx + d.$

Составим таблицы 2 и 3 обобщающих величин:

Таблица 2

Таблица обобщающих величин

i	x_i	y_i	x_i^2	x_i^3	x_i^4	x_i^5
1	913	725	833569	761048497	694837277761	634386434595793
2	916	680	839056	768575296	704014971136	644877713560576
3	918	606	842724	773620632	710183740176	651948673481568
4	919	651	844561	776151559	713283282721	655507336820599
5	922	629	850084	783777448	722642807056	666276668105632
6	926	606	857476	794022776	735265090576	680855473873376
7	928	592	861184	799178752	741637881856	688239954362368
8	931	588	866761	806954491	751274631121	699436681573651
9	933	554	870489	812166237	757751099121	706981775479893
10	940	517	883600	830584000	780748960000	733904022400000
…						
50	1069	89	1142761	1221611509	1305902703121	1396009989636349
51	1075	87	1155625	1242296875	1335469140625	1435629326171875
52	1080	85	1166400	1259712000	1360488960000	1469328076800000
53	1082	84	1170724	1266723368	1370594684176	1482983448278432
54	1088	82	1183744	1287913472	1401249857536	1524559844999168
∑	53847	15306	53828411	53942999805	54190191963047	54570063806303870

Таблица 3

Таблица обобщающих величин

I	x_i^6	$x_i y_i$	$x_i^2 y_i$	$x_i^3 y_i$	x_i^5
1	579194814785959000	661925	604337525	551760160325	634386434595793
2	590707985621487600	622880	570558080	522631201280	644877713560576
3	598488882256079400	556308	510690744	468814102992	651948673481568
4	602411242538130400	598269	549809211	505274664909	655507336820599
5	614307087993392600	579938	534702836	492996014792	666276668105632
6	630472168806746100	561156	519630456	481177802256	680855473873376
7	638686677648277500	549376	509820928	473113821184	688239954362368
8	651175550545069000	547428	509655468	474489240708	699436681573651
9	659613996522740200	516882	482250906	449940095298	706981775479893
10	689869781056000000	485980	456821200	429411928000	733904022400000
…					
50	1492334678921257000	95141	101705729	108723424301	1396009989636349
51	1543301525634765600	93525	100539375	108079828125	1435629326171875
52	1586874322944000000	91800	99144000	107075520000	1469328076800000
53	1604588091037263400	90888	98340816	106404762912	1482983448278432
54	1658721111359094800	89216	97067008	105608904704	1524559844999168
∑	55083338305625670000	14763833	14270616583	13823577891509	54570063806303870

Найдём коэффициенты *a,b,c,d* уравнения кубической регрессии из системы уравнений:

$$\begin{cases} a\sum x_i^3 + b\sum x_i^2 + c\sum x_i + nd = \sum y_i; \\ a\sum x_i^4 + b\sum x_i^3 + c\sum x_i^2 + d\sum x_i = \sum x_i y_i; \\ a\sum x_i^5 + b\sum x_i^4 + c\sum x_i^3 + d\sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i; \\ a\sum x_i^6 + b\sum x_i^5 + c\sum x_i^4 + d\sum x_i^3 = \sum x_i^3 y_i; \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} 53942999805a + 53828411b + 53847c + 54d = 15306, \\ 54190191963047a + 53942999805b + 53828411c + 53847d = 14763833, \\ 54570063806303864a + 54190191963047b + 53942999805c + 53828411d = 14270616583, \\ 550833383056256800000a + 54570063806303864b + 54190191963047c + 53942999805d = 13823577891509. \end{cases}$$

Решим эту систему линейных уравнений методом Крамера:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 53942999805 & 53828411 & 53847 & 54 \\ 54190191963047 & 53942999805 & 53828411 & 53847 \\ 54570063806303864 & 54190191963047 & 53942999805 & 53828411 \\ 55083338305625680000 & 54570063806303864 & 54190191963047 & 53942999805 \end{vmatrix} = 1.3354091844546652e + 27;$$

$$\Delta a = \begin{vmatrix} 15306 & 53828411 & 53847 & 54 \\ 14763833 & 53942999805 & 53828411 & 53847 \\ 14270616583 & 54190191963047 & 53942999805 & 53828411 \\ 13823577891509 & 54570063806303864 & 54190191963047 & 53942999805 \end{vmatrix} = 7.736640217379163e + 22 \Longrightarrow$$

$$\Longrightarrow a = \frac{\Delta a}{\Delta} = \frac{7.736640217379163e+22}{1.3354091844546652e+27} \approx 0;$$

$$\Delta b = \begin{vmatrix} 53942999805 & 15306 & 53847 & 54 \\ 54190191963047 & 14763833 & 53828411 & 53847 \\ 54570063806303864 & 14270616583 & 53942999805 & 53828411 \\ 55083338305625680000 & 13823577891509 & 54190191963047 & 53942999805 \end{vmatrix} = -1.9975317301278792e + 26 \Longrightarrow$$

$$\Longrightarrow b = \frac{\Delta \mathrm{b}}{\Delta} = \frac{-1.9975317301278792e + 26}{1.3354091844546652e + 27} \approx -0{,}15;$$

$$\Delta c = \begin{vmatrix} 53942999805 & 53828411 & 15306 & 54 \\ 54190191963047 & 53942999805 & 14763833 & 53847 \\ 54570063806303864 & 54190191963047 & 14270616583 & 53828411 \\ 55083338305625680000 & 54570063806303864 & 13823577891509 & 53942999805 \end{vmatrix} = 1.6226277871661278e + 29 \Longrightarrow$$

$$\Longrightarrow c = \frac{\Delta \mathrm{c}}{\Delta} = \frac{1.6226277871661278e + 29}{1.3354091844546652e + 27} \approx 121.51;$$

$$\Delta d = \begin{vmatrix} 53942999805 & 53828411 & 53847 & 15306 \\ 54190191963047 & 53942999805 & 53828411 & 14763833 \\ 54570063806303864 & 54190191963047 & 53942999805 & 14270616583 \\ 55083338305625680000 & 54570063806303864 & 54190191963047 & 13823577891509 \end{vmatrix} = -3.9590821760172206e + 31 \Longrightarrow$$

$$\Longrightarrow d = \frac{\Delta d}{\Delta} = \frac{-3.9590821760172206e + 31}{1.3354091844546652e + 27} \approx -29646.96.$$

Итак, искомое уравнение кубической регрессии имеет вид: $\hat{y} = -0{,}15x^2 + 121.51x - 29646.96$. Сделаем общий чертёж диаграммы рассеяния и графика уравнения кубической регрессии (рис. 1). Необходимой процедурой предварительного анализа ВР является выявление аномальных уровней ряда. В предварительный анализ входит также сглаживание (выравнивание) временных рядов. Аномальные значения уровней ВР можно обнаружить визуально по графику ряда (рис.1).

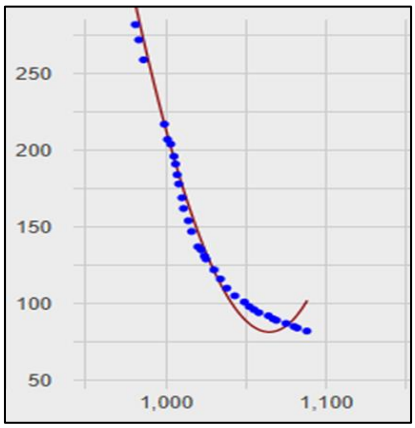


Рис. 1 - Кубическая регрессия

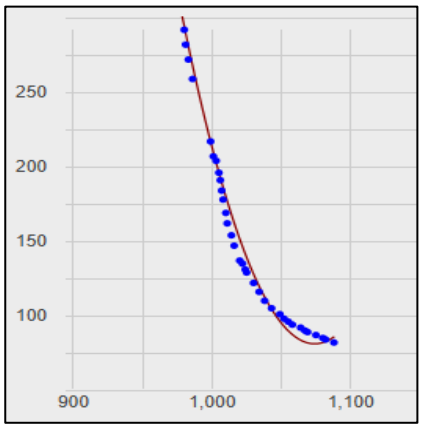


Рис. 2 - Квадратичная регрессия

С целью более четкого выявления тенденций движения судна-цели, в том числе для дальнейшего применения методов прогнозирования на основе трендовых моделей на предварительной стадии производится выравнивание временных рядов (рис. 1).Анализ качества уравнения кубической регрессии: $\hat{y} = -0{,}15x^2 + 121.51x - 29646.96$ включает в себя проверку статистической значимости каждого коэффициента уравнения регрессии и всего уравнения в целом. Основные этапы анализа качества уравнения регрессии включают:

- Проверка общего качества: Оценка, насколько хорошо эмпирическое уравнение регрессии согласуется со статистическими данными.
- Проверка статистической значимости:
- Оценка, насколько надежны найденные оценки коэффициентов регрессии.

Оценка качества построенных уравнений. Использование коэффициента детерминации для оценки доли вариации результативного признака, находящегося под воздействием изучаемых факторов. Чем ближе к 1, тем выше качество модели. Эти этапы помогают определить, пригодно ли уравнение регрессии для практического использования, например, для прогноза. Для оценки значимости параметров регрессии и корреляции сначала:

- найдем у средний $\overline{y} = \frac{1}{n}\sum y_i = \frac{15.306}{54} = 283.44$;
- составим таблицу 4 вспомогательных величин, где $\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i, \Delta\varepsilon_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}, A_i = \left|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right|$:

Таблица 4

Таблица вспомогательных величин

l	x_i	y_i	$\hat{y}_i$	$y_i - \overline{y}$	$(y_i - \overline{y})^2$	ε_i	ε_i^2	A_i	$\Delta\varepsilon_i$	$(\Delta\varepsilon_i)^2$
1	913	725	693.89	441.56	194971.31	31.11	967.85	0.04	—	—
2	916	680	673.72	396.56	157256.31	6.28	39.45	0.01	−24.83	616.5
3	918	606	660.37	322.56	104042.09	−54.37	2955.85	0.09	−60.65	3678.25
4	919	651	653.72	367.56	135097.09	−2.72	7.41	0	51.65	2667.31
5	922	629	633.91	345.56	119408.64	−4.91	24.08	0.01	−2.19	4.78
6	926	606	607.79	322.56	104042.09	−1.79	3.2	0	3.12	9.73
7	928	592	594.86	308.56	95206.53	−2.86	8.19	0	−1.08	1.16
8	931	588	575.65	304.56	92754.09	12.35	152.47	0.02	15.21	231.37
9	933	554	562.97	270.56	73200.31	−8.97	80.4	0.02	−21.31	454.31
10	940	517	519.38	233.56	54548.2	−2.38	5.66	0	6.59	43.41
…										
50	1069	89	82.1	−194.44	37808.64	6.9	47.58	0.08	−1.49	2.22
51	1075	87	85.33	−196.44	38590.42	1.67	2.8	0.02	−5.22	27.28
52	1080	85	90.06	−198.44	39380.2	−5.06	25.58	0.06	−6.73	45.32
53	1082	84	92.48	−199.44	39778.09	−8.48	71.94	0.1	−3.42	11.72
54	1088	82	101.61	−201.44	40579.86	−19.61	384.62	0.24	−11.13	123.88
∑	—	—	—	—	2052515.33	—	8535.1	2.5	—	8806.61

Индекс корреляции (R) — это статистическая мера, которая оценивает степень связи между двумя переменными. Он принимает значения от -1 до 1, где: -1 указывает на идеальную линейную зависимость, когда изменение одной переменной приводит к изменению другой; 0 свидетельствует о полном отсутствии линейной связи;1 означает, что между переменными существует функциональная зависимость. Рассчитаем индекс корреляции модели (R):

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \overline{y})^2}} = \sqrt{1 - \frac{8535.1}{2052515.33}} = \sqrt{1 - 0.004} = \sqrt{0.9960} = 0.998;$$

Для проверки общего качества уравнения регрессии обычно используется коэффициент детерминации (R^2). Коэффициент детерминации является статистической мерой согласия, с помощью которой можно определить, насколько модель соответствует данным, на которых она построена. Коэффициент детерминации изменяется в диапазоне от $-\infty$ до 1. Если он равен 1, это соответствует идеальной модели, когда все точки наблюдений лежат точно на линии регрессии, т.е. сумма квадратов их отклонений равна 0.

Рассчитаем Индекс детерминации: $R^2 = 0.998^2 = 0.996$;

На практике, если коэффициент детерминации близок к 1, это указывает на то, что модель работает очень хорошо (имеет высокую значимость), а если к 0, то это означает низкую значимость модели, когда входная переменная плохо «объясняет» поведение выходной, т.е. линейная зависимость между ними отсутствует. Очевидно, что такая модель будет иметь низкую эффективность. Коэффициент детерминации R^2 = 0,996 показывает, что уравнением регрессии объясняется 99,6% дисперсии результативного признака, а на долю прочих факторов приходится 0,4%.

Вычислим среднюю ошибку аппроксимации:

$$\overline{A} = \frac{1}{n}\sum\left|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right| \cdot 100\% = \frac{2.5}{54} \cdot 100\% = 4.6\%;$$

Средняя ошибка аппроксимации — это среднее относительное отклонение расчётных значений $\hat{y}$ от фактических *y*. Построенное уравнение регрессии считается удовлетворительным, если значение *A* не превышает 8 – 10 %. Чем выше показатель детерминации или чем ниже средняя ошибка

аппроксимации, тем лучше модель описывает исходные данные.

Оценка значимости уравнения регрессии на основе *F-критерия Фишера*. Сравним фактическое значение критерия Фишера с табличным. Для этого выпишем значения критерия Фишера из таблицы «Значения *F*-критерия Фишера при уровне значимости $\alpha = 0.05$»:

1) критический (табличный):

$F_{tabl} = F(a, k_1, k_2) = F(0.05, 3, 50) \approx 2.79.$

Так как $k_1 = m = 3, k_2 = n - m - 1 = 54 - 3 - 1 = 50$, $\alpha = 0{,}05$.

где: k_1, k_2 – количество групп и количество наблюдений;

n – совокупное число признаков;

m– это число параметров при переменных уравнения регрессии.

2) фактический:

$$F_{fakt} = \frac{R^2}{1-R^2}\frac{k_2}{k_1} = \frac{0{,}996}{1-0.996}\frac{50}{3} = 4150;$$

$F_{tabl} = 2.79 < F_{fakt} = 4150.$

Если $F_{tabl} < F_{fakt}$, то нулевая гипотеза о случайной природе оцениваемых характеристик отклоняется и признаётся их статистическая значимость и надёжность, если $F_{tabl} > F_{fakt}$, то признаётся статистическая незначимость модели и ненадёжность уравнения регрессии.

Анализ и выбор лучшей модели по триаде оценки: ошибка аппроксимации, R², F-критерий. Для анализа и выбора лучшей модели произведем расчеты уравнений регрессии и их оценок кроме кубической дополнительно квадратичной, линейной, экспоненциальной, логарифмической, степенной и гиперболической регрессий. Покажем результаты обработки параметров в табличной форме (Табл.5):

Таблица 5

Сравнительная оценочная таблица статистических ВР АИС за [Δt_i]

	Уравнение регрессии	Средняя ошибка аппроксимации	Коэффициент детерминации (R^2)	F-критерий Фишера
Куб.	$\hat{y} = -0.15x^2 + 121.5x - 29646.96$	$\overline{A} = \frac{1}{n}\sum\left\|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right\| \cdot 100\% = \frac{2.5}{54} \cdot 100\% = 4.6\%;$	$R^2 = 0.998^2 = 0.996$	$F_{tabl} = 2.79 < F_{fakt} = 4150$
Квадрат	$\hat{y} = 0.02x^2 - 51.75x + 27873.96$	$\overline{A} = \frac{1}{n}\sum\left\|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right\| \cdot 100\% = \frac{2.32}{54} \cdot 100\% = 4.3\%;$	$R^2 = 0.99^2 = 0.99$	$F_{tabl} = 3.18 < F_{fakt} = 4962.3$
Линейн ая	$\hat{y} = -3.72x + 3995.91$	$\overline{A} = \frac{1}{n}\sum\left\|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right\| \cdot 100\% = \frac{17.33}{54} \cdot 100\% = 32.09\ \%;$	$R^2 = -0.95^2 = 0.9$	$F_{tabl} = 4.03 < F_{fakt} = 494$
Эксп.	$\hat{y} = 250120419.47 \cdot 0.99^x$	$\overline{A} = \frac{1}{n}\sum\left\|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right\| \cdot 100\% = \frac{4.31}{54} \cdot 100\% = 7.98\ \%;$	$R^2 = 0.99^2 = 0.98$	$F_{tabl} = 4.03 < F_{fakt} = 3950.6$
Логарм.	$\hat{y} = 26043.36 - 3731lnx$	$\overline{A} = \frac{1}{n}\sum\left\|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right\| \cdot 100\% = \frac{16.22}{54} \cdot 100\% = 30.04\ \%;$	$R^2 = 0.96^2 = 0.922$	$F_{tabl} = 4.03 < F_{fakt} = 583.36$
Степ.	$\hat{y} = 1.19855e + 44x^{-13.92}$	$\overline{A} = \frac{1}{n}\sum\left\|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right\| \cdot 100\% = \frac{4.19}{54} \cdot 100\% = 7.76\ \%;$	$R^2 = 0.99^2 = 0.98$	$F_{tabl} = 4.03 < F_{fakt} = 3256.4$
Гипер.	$\hat{y} = -3465.29 + \frac{3728756.97}{x}$	$\overline{A} = \frac{1}{n}\sum\left\|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right\| \cdot 100\% = \frac{15.1}{54} \cdot 100\% = 4.6\%;$	$R^2 = 0.96^2 = 0.93$	$F_{tabl} = 4.03 < F_{fakt} = 695.5$

Результаты (Results)

Выбор лучшей модели движения судна-цели. Поставим задачу выбора лучшей модели исходя из оценки: ошибки аппроксимации A, R², F-критерия. Критерии выбора лучшей модели ВР АИС следующие:

А. Ошибка аппроксимации (средняя ошибка аппроксимации) показывает: среднюю относительную ошибку прогноза. Если:

- A <7% — отличная точность (высокое качество модели);
- 8% ≤ A ≤ 10% — хорошая точность;
- 11% ≤ A ≤ 15% — удовлетворительная точность;

15% — неудовлетворительная точность.

Б. Коэффициент детерминации R² показывает долю дисперсии зависимой переменной *y*. Если R^2 лежит в пределах 0 ≤ *R²* ≤ 1 и чем ближе к 1, тем точнее модель.

В. F-критерий Фишера (F-тест). F-критерий сравнивает две дисперсии: F_{fakt} = Объясненная дисперсия модели / Необъясненная дисперсия. Чем больше F_{fakt}:

- тем больше доля дисперсии, которую объясняет модель;

- тем меньше остаточная (необъясненная) дисперсия;
- тем сильнее связь между переменными в модели.

Оценивая критерии и полученные результаты вычислений каждой модели целесообразно рассматривать только кубическую и квадратическую модели. Анализ преимуществ каждой модели следующий:

Квадратичная модель (R^2=0.99, A=4.3%, F=4962):

- Лучшая практическая точность (ошибка 4.3%);
- Выше F-статистика (4962> 4166), т.е. модель статистически значимее;
- Чуть хуже теоретическое соответствие (R^2 ниже на 0.006).

Кубическая модель (R^2=0.996, A=4.6%, F=4166):

- Чуть лучшее соответствие (R^2 выше на 0.006);
- Хотя F-статистика (4166<4962) однако обе модели демонстрирует очень сильную связь, что практически исключает случайность в объяснении данных;
- Хуже ошибка аппроксимации (4.6%> 4.3%).

Г. Кроме того, следует обратить внимание на то, что в уравнении кубической регрессии коэффициент $a = 0$, что приводит к выводу о незначимости кубического члена модели. В результате чего, модель приобрела квадратичный вид: $\hat{y} = -0.15x^2 + 121.5x - 29646.96$.

Д. Дополнительно проведем графический анализ квадратичной и кубической моделей.

Построим обе модели на графике с исходными точками. Кривые на рисунке 1 и 2 практически совпадают.

Таким образом, рассмотрен случай, когда и квадратичная и кубическая модели - обе хороши. Однако при равенстве метрик выбирать следует более простую модель в соответствии с принципом Оккама: «При равных объяснениях следует предпочесть наиболее простое». Окончательный выбор: квадратичная модель (лучший баланс).

Обсуждение (Discussion)

К сожалению, классические статистические методы на практике имеют достаточно ограниченную область изучения и удовлетворительного применения. Эксперименты проведенные на нескольких судах компании Novoship показали, что стандарты [13,14], выдачи динамической информации GPS и АИС на коротких временных интервалах в различных районах мирового океана при различных скоростях судов с использованием различных моделей приемных устройств GPS и АИС показывают не стандартные результаты. Следовательно, единый подход для создания системы мониторинга по времени (a time-triggered (TT) system) с фиксированным тактом часов не представляется возможным. В этом случае усилия исследователей должны быть направлены на решение задачи разработки интеллектуального мониторинга СППР с возможностью адекватного анализа нестационарных распределений, получаемых по наблюдениям динамической информации АИС. Несмотря на то, что многие теоретические и практические вопросы обработки нестационарных, неэквидистантных временных рядов развиты достаточно хорошо, однако практический опыт применения математического аппарата и вычислительной техники в задачах сопровождения и предупреждения столкновений судов развит крайне слабо, прежде всего, по нашему мнению, из-за сложностей валидации, которая должна учитывать многообразность технического эксперимента с использованием различной аппаратуры ГНСС и АИС по выдаче динамической информации на конвенционных и высокоскоростных судах в любых обстоятельствах/условиях плавания в различных районах мирового океана. А следовательно, в дальнейших исследованиях следует учитывать полученные результаты исследований как стационарных [4], так и нестационарных временных рядов ГНСС и АИС. Полученные результаты в режиме оффлайн должны стать базисом дальнейших исследований направленных на разработку систем прогнозирования в СППР в режиме реального времени.

Заключение (Conclusion)

В статье рассматривается плавание судна-цели с неравномерностью распределений места $(\varphi_{\text{ц}}, \lambda_{\text{ц}})$, курса и скорости судна-цели $(K_{\text{ц}}, V_{\text{ц}})$ по времени на всем отрезке пути в интервале $[\Delta t_1]$. Такие сложные модели движения присущи моделям при маневрировании судна-цели с неравномерным криволинейным движением с различной не нулевой угловой скоростью и переменной скоростью судна-цели. Изменение скорости влечет и изменение шага дискретизации $[\Delta t]$ ВР АИС, то есть моментов времени получения информации. В этом случае модель движения судна описывается нестационарными, неэквидистантными ВР АИС. Практический анализ нелинейного движения судна-цели по наблюдениям параметров АИС, выполнен с помощью регрессионного анализа с выделением тренда. Анализ показывает возможность использования динамической информации АИС в качестве основного технического средства для исследования динамики движения судов-целей. Подтверждением этого является наглядность, высокая точность метода, подтверждаемая наличием тестирования получаемых результатов по критериям: ошибки аппроксимации (A), коэффициента детерминации (R^2) и F-критерия Фишера.

Литература

1. Сборник № 65 резолюций ИМО = Collection # 65 of IMO Resolutions, тексты на русском и английском языках, 2021 СПб.: АО "ЦНИИМФ", 2021 - 224 с.
2. *Астреин В.В.* Анализ информации АИС и моделей для построения пространственно-временных алгоритмов прогнозирования движения судов в море / В.В. Астреин, С.И. Кондратьев, А.Л. Боран-Кешишьян, Л.Б.

Астреина, В.И. Филатов // Морские интеллектуальные технологии. - 2024. - № 1 часть 1, - С. 159—170. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.020
3. *Астреин В.В.* Исследование динамической информации ГНСС и АИС для слежения и предупреждения столкновений судов / В.В. Астреин, В.И. Филатов // Морские интеллектуальные технологии. -2024. - № 3 часть 1, - С. 222—229. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.044
4. *Астреин В.В.* Исследование динамики линейных одномерных рядов АИС методами регрессионного анализа для сопровождения судна-цели / В.В. Астреин, Л.Б. Астреина, В.И. Филатов // Морские интеллектуальные технологии. - 2025. - № 1 часть 1, - С. 117—123. DOI 10.37220/MIT.2025.67.1.014.
5. *Марлей В.Е.* Прогнозирование состояния судоходного трафика на основе временных рядов данных автоматической идентификационной системы с применением сети длительной краткосрочной памяти / В.Е. Марлей, А.Н. Терехов, Ю.А. Гатчин, В.И. Милушков, Н.Н. Лиманский // Динамика сложных систем. - 2024. Т. 18. - № 4. - С. 28−40. DOI: 10.18127/j19997493-202404-03
6. Mascaro S., Korb K., Nicholson A. Learning Abnormal Vessel Behaviour from AIS Data with Bayesian Networks at Two Time Scales. *Tracks a Journal of Artists Writings*. 2010. P. 1–34. https://doi.org/10.1016/j.ijar.2013.03.012
7. Bao K., Shang D., Wang R., Ma R. AIS big data framework for maritime safety supervision. Proceedings – 2020 *International Conference on Robots and Intelligent Systems, ICRIS.* 2020. P. 150–153. https://doi.org/10.1109/ICRIS52159.2020.00045
8. Wang S., Li Y., Xing H. A novel method for ship trajectory prediction in complex scenarios based on spatio-temporal features extraction of AIS data. *Ocean Engineering.* 2023. V. 281. Article 114846. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114846
9. Ribeiro, C.V.; Paes, A.; de Oliveira, D. AIS-based maritime anomaly traffic detection: A review. *Expert Syst.* Appl. 2023, 231, 120561.
10. Rong, H.; Teixeira, A.P.; Soares, C.G. Ship collision avoidance behavior recognition and analysis based on AIS data. *Ocean Eng.* 2022, 245, 110479.
11. Liu, Z.; Zhang, B.; Zhang, M.; Wang, H.; Fu, X. A quantitative method for the analysis of ship collision risk using AIS data. *Ocean Eng.* 2023, 272, 113906.
12. Chen, X.; Liu, Y.; Achuthan, K.; Zhang, X. A ship movement classification based on Automatic Identification System (AIS) data using Convolutional Neural Network. *Ocean Eng.* 2020, 218, 108182.
13. IEC 61108-1:2003 Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems - Global navigation satellite systems (GNSS) - Part 1: Global positioning system (GPS) - Receiver equipment - Performance standards, methods of testing and required test results. *International Electrotechnical Committee.* 2003.
14. IEC 61993-2-2018 Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Automatic identification systems (AIS) – Part 2: Class A shipborne equipment of the automatic identification system (AIS) – Operational and performance requirements, methods of test and required test results. *International Electrotechnical Committee*. 2018.
15. Прохоров С.А. Прикладной анализ неэквидистантных временных рядов. / С.А. Прохоров. - Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет. 2001, - 375 с.
16. Саженкова, Т.В. Методы анализа временных рядов: учебно-методическое пособие / Т. В. Саженкова, И. В. Пономарёв, С. П. Пронь. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та. – 2020. – 60 с.
17. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов: Учеб. пособие. / Ю.П. Лукашин. - М.: Финансы и статистика, 2003.-416 с: ил.

References

1. Collection # 65 of IMO Resolutions, texts in Russian and English, 2021 St. Petersburg: JSC TsNIIMF, 2021 - 224 p.
2. Vadim V. Astrein, Sergey I. Kondratiev, Anastas L. Boran-Keshishian, Ludmila. B. Astreina, Viktor I. Filatov, Analysis of AIS information and models for constructing spatio-temporal algorithms for predicting vessel traffic. *Marine intellectual technologies* 2024. № 1 part 1, P. 159—170. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.020
3. Vadim V. Astrein, Viktor I. Filatov, Study of dynamic information of GNSS and AIS for tracking and preventing collisions of ships, *Marine intellectual technologies*. 2024. № 3 part 1, P. 222—229. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.044
4. Vadim V. Astrein, Liudmila B. Astreina, Viktor I. Filatov. Study of the dynamics of linear one-dimensional series of the Automatic identification system by regression analysis methods for tracking the target vessel. *Marine intellectual technologies*. 2025. № 1 part 1, P. 117—123. DOI: 10.37220/MIT.2025.67.1.014.
5. Marley V.E., Terekhov A.N., Gatchin Yu.A., Milushkov V.I., Limansky N.N. Forecasting the state of shipping traffic based on time series of automatic identification system data using a long short-term memory network // *Dynamics of complex systems*. 2024. Vol. 18. No. 4. pp. 28−40. DOI: 10.18127/j19997493-202404-03
6. Mascaro S., Korb K., Nicholson A. Learning Abnormal Vessel Behaviour from AIS Data with Bayesian Networks at Two Time Scales. Tracks a Journal of Artists Writings. 2010. P. 1–34. https://doi.org/10.1016/j.ijar.2013.03.012
7. Bao K., Shang D., Wang R., Ma R. AIS big data framework for maritime safety supervision. Proceedings – 2020 International Conference on Robots and Intelligent Systems, ICRIS. 2020. P. 150–153. https://doi.org/10.1109/ICRIS52159.2020.00045
8. Wang S., Li Y., Xing H. A novel method for ship trajectory prediction in complex scenarios based on spatio-temporal features extraction of AIS data. Ocean Engineering. 2023. V. 281. Article 114846. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114846
9. Ribeiro, C.V.; Paes, A.; de Oliveira, D. AIS-based maritime anomaly traffic detection: A review. Expert Syst. Appl. 2023, 231, 120561.

10. Rong, H.; Teixeira, A.P.; Soares, C.G. Ship collision avoidance behavior recognition and analysis based on AIS data. Ocean Eng. 2022, 245, 110479.
11. Liu, Z.; Zhang, B.; Zhang, M.; Wang, H.; Fu, X. A quantitative method for the analysis of ship collision risk using AIS data. Ocean Eng. 2023, 272, 113906.
12. Chen, X.; Liu, Y.; Achuthan, K.; Zhang, X. A ship movement classification based on Automatic Identification System (AIS) data using Convolutional Neural Network. Ocean Eng. 2020, 218, 108182.
13. IEC 61108-1:2003 Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems - Global navigation satellite systems (GNSS) - Part 1: Global positioning system (GPS) - Receiver equipment - Performance standards, methods of testing and required test results. International Electrotechnical Committee. 2003.
14. IEC 61993-2-2018 Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Automatic identification systems (AIS) – Part 2: Class A shipborne equipment of the automatic identification system (AIS) – Operational and performance requirements, methods of test and required test results. International Electrotechnical Committee. 2018.
15. Prokhorov S.A. Applied analysis of nonequidistant time series. *Samara State Aerospace University*. 2001, - 375 p.
16. Tatiana V. Sazhenkova, Igor V. Ponomarev, Sergey P. Pron Methods of time series analysis: a teaching aid / T.V. Sazhenkova,. - Barnaul: *Publishing house of Alt. University*. - 2020. - 60 p.
17. Yu. P. Lukashin Adaptive methods of short-term forecasting of time series: Textbook. Manual. *Finance and Statistics*, 2003.-416 p: ill.

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

Астреин Вадим Викторович —доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова» 353918, Российская Федерация, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93. e-mail: astrein-vadim@rambler.ru..

Vadim V. Astrein — Doctor of Technical Sciences, Professor Admiral F. F. Ushakov State Maritime University 93, Lenin Avenue, Novorossiysk, 353918, Russian Federation. e-mail: astrein-vadim@rambler.ru.

Кондратьев Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор ФГБОУ Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова 53918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. e-mail: pcom@aumsu.ru

Sergey I. Kondratiev Doctor of Technical Sciences, Professor Admiral F. F. Ushakov State Maritime University 93, Lenin Avenue, Novorossiysk, 353918, Russian Federation. e-mail: pcom@aumsu.ru

Астреина Людмила Борисовна, кандидат географических наук, доцент ФГБОУ Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. e-mail: astreina-ludmila@gmail.com

Liudmila B. Astreina, Candidate of Geographical Sciences, assistant Professor Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. e-mail: astreina-ludmila@gmail.com

Филатов Виктор Иванович - кандидат технических наук, доцент ФГБОУ Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова 53918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. e-mail: Filatov_viktor1994@mail.ru

Victor I. Filatov, Candidate of Technical Sciences, assistant Professor Admiral F. F. Ushakov State Maritime University 93, Lenin Avenue, Novorossiysk, 353918, Russian Federation e-mail: Filatov_viktor1994@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 19.02.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.05.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 23.06.2026.

Научная статья
УДК 531.391.1:532.5.011
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.049

Исследование нелинейной модели движения судна-цели по параметрам Автоматической идентификационной системы

Астреин В.В.[1] Astrein-vadim@rambler.ru**, Кондратьев С.И.**[1] zur_mga@nsma.ru**,**
Астреина Л.Б.[1] astreina-ludmila@gmail.com**, Филатов В.И.**[1] Filatov_viktor1994@mail.ru
[1]Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В статье представлены основные принципы и методы обработки многопараметрической информации, получаемой с помощью судовой Автоматической идентификационной системы (АИС). Необходимость в обработке именно информации АИС при прогнозировании движения судна-цели для предупреждения столкновений судов вызвана преимуществами АИС перед существующим методами прогнозирования по параметрам радиолокационных измерений прежде всего из-за точности и надежности информации, что безусловно является ключевым аспектом при разработке Систем поддержки принятия решений (СППР) для морского автономного судна (МАНС). В сжатой форме исследуются: физический процесс сопровождения судна-цели для определения индикаторных параметров сопровождения и математические модели пригодные для обработки временных рядов (ВР) АИС. Исследуются причины выбора коротких временных рядов, методы сглаживания, аномалии временных рядов и общая схема построения адаптивных моделей прогнозирования движения судна-цели с использованием ВР АИС. Предложен поэтапный анализ временных рядов АИС и моделей для прогнозирования движения судов в море на примере неравномерного криволинейного движения судна-цели на случайных кусочно-интервальных отрезках времени. Предложенный метод исследования пригоден для построения прогнозирования пространственно-временных алгоритмов сопровождения и движения МАНС в режиме реального времени и может стать основным способом сопровождения и предупреждения столкновений судов в море.
Ключевые слова: Система поддержки принятия решений, морское автономное судно, сопровождение судна, предупреждение столкновений судов, обработка информации АИС, временные ряды, методы обработки информации АИС
Для цитирования: Астреин В.В., Кондратьев С.И., Астреина Л.Б., Филатов В.И. Исследование нелинейной модели движения судна - цели по параметрам Автоматической Идентификационной Системы, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 213—221. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.049

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.049

Research of the nonlinear model of moving the target vessel based on the Automatic identification system parameters

Vadim V. Astrein[1] Astrein-vadim@rambler.ru**, Sergey I. Kondratiev**[1] zur_mga@nsma.ru,
Ludmila B. Astreina[1] astreina-ludmila@gmail.com.**, Viktor I. Filatov**[1]: Filatov_viktor1994@mail.ru.
[1]Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. The article presents the basic principles and methods of processing multiparameter information obtained using the ship's Automatic Identification System (AIS). The need to process AIS information when predicting the target vessel's movement to prevent collisions is due to the advantages of AIS over existing forecasting methods based on radar measurement parameters, primarily due to the accuracy and reliability of information, which is certainly a key aspect in developing Decision Support Systems (DSS) for an autonomous marine vessel (MANS). The following are briefly examined: the physical process of target vessel tracking in order to determine the indicator parameters of tracking and mathematical models suitable for processing AIS time series (TS). The reasons for choosing short time series, smoothing methods, time series anomalies and the general scheme for constructing adaptive models for predicting the target vessel's movement using AIS TS are examined. A step-by-step analysis of AIS time series and models for forecasting ship movement at sea is proposed using the example of uneven curvilinear movement of a target vessel on random piecewise interval time segments. This method is suitable for constructing spatio-temporal algorithms for tracking and forecasting the movement of MANS in real time and can become the main method for tracking and preventing ship collisions at sea.
Keywords: Decision support system, autonomous marine vessel, vessel escort, collision avoidance, AIS information processing, time series, AIS information processing methods
For citation: Vadim V. Astrein, Sergey I. Kondratiev, Liudmila B. Astreina, Viktor I. Filatov Study of the linear model's target vessel motion based on the Automatic identification system parameters, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 213—221. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.049

© Астреин В.В., Кондратьев С.И. Астреина Л.Б., Филатов В.И. 2026

Введение

Мы рассматривали тему автоматического сопровождения (мониторинга), прогнозирования, планирования и принятия решений для предупреждения столкновений судов в море в ряде наших статей. В предыдущих работах [1,2] показано, что обеспечение безопасности в Системе поддержки принятия решений (СППР) автономного судовождения,
определяется двумя факторами: точностью исходных данных и степенью адекватности используемых математических моделей. В [3] показано, что благодаря наличию высокоточных систем определения места судна (СНС) и обмену данными с помощью АИС, имеется возможность точного сопровождения и определения параметров судов-целей, а, следовательно, повышения качества и эффективности выработки решений по предупреждению столкновений и управлению судном в режиме реального времени. Сравнивая параметры точности РЛС/САРП и АИС, авторы приходят к выводу, что преимущества параметров АИС должны стать основным средством автоматического мониторинга и сопровождения МАНС.

Несмотря на привлекательность использования информации АИС для сопровождения и возможности прогнозирования движения судов, до сих пор не создано эффективных методов и алгоритмов, которые могли бы обрабатывать информацию АИС в автоматическом режиме реального времени. Эта проблема нами рассматривается в [3].

Криволинейное движение судна-цели для предупреждения столкновений судов на случайных кусочно-интервальных отрезках времени можно описать чередой линейных и нелинейных моделей движения. Переход от одного режима движения в другой, вызванный необходимостью маневрирования, определяются моментом разладки. Переход моделей движения и момент разладки достаточно подробно описан в [1,2]. При расхождении судов момент разладки является подтверждением того, что судно-цель начало предпринимать предписанные Международными правилами предупреждения столкновения судов в море (МППСС-72) действия для предупреждения опасности столкновения.

Наши исследования в [1-5] проведены для линейного движения судов. Целью данной статьи является поэтапный анализ временных рядов АИС нелинейного движения для сопровождения и прогнозирования движения судов в море.

Физические модели нелинейного движения судна в ситуациях предупреждения столкновений

Физические модели нелинейного движения судна обеспечивают необходимую точность для предупреждения столкновений судов, дают количественную основу для расплывчатых понятий МППСС-72, позволяют осуществлять прогноз поведения судов-целей.

Движение судна становится нелинейным в случаях маневрирования курсом, скоростью или совместно курсом и скоростью, а также в случае набора скорости или торможения.

По МППСС-72 нелинейное движение наблюдается в ситуациях описанных в Разделе II Плавание судов, находящихся на виду друг у друга (Правило 14 *Ситуация сближения судов, идущих прямо друг на друга*, Правило 17 *Действия судна, которому уступают дорогу*).

Модель движения для предупреждения столкновений судна-наблюдателя (А) и маневрирующего судна-цели (В) можно описать моделями нестационарного неравномерного движения на кусочно-интервальных отрезках времени (рис. 1 А, Б).

Наблюдаемое первоначально линейное движение судов по Правилу 14 идущих друг на друга изменяется в следствие требования - изменить курс вправо с тем, чтобы пройти у другого судна по левому борту. Выполняя маневр курсом движение обоих судов приобретает нелинейный характер. При этом наблюдается высокая относительная скорость сближения равная сумме скоростей двух судов - $(V_{\text{отн}})$. А время сближения судов в среднем, при современных скоростях, составляет 8-10 минут. За это время необходимо оценить ситуацию по параметрам сближения судов, предпринять заблаговременный маневр и разойтись на расстоянии - (D_i).

Для разрешения ключевых лингвистических неопределенностей МППСС Правила 14 «прямо или почти прямо по носу» и дистанции начала маневра – $(S_{\text{м}})$ в ситуации сближения судов каждое судно должно вести постоянное наблюдение (сопровождение) за траекторным движением судна-цели $(\text{К}_{\text{ц}}, V_{\text{ц}})$.

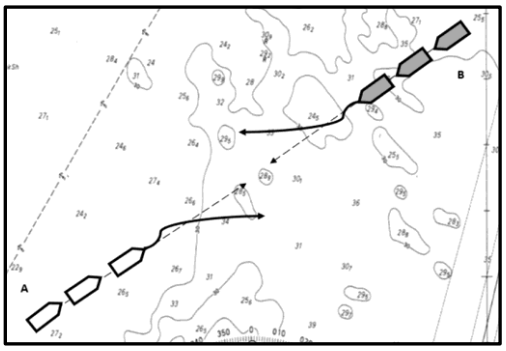


Рис. 1 А – Траектории движения судов в ситуациях Правил МППСС 14 Ситуация сближения судов, идущих прямо друг на друга

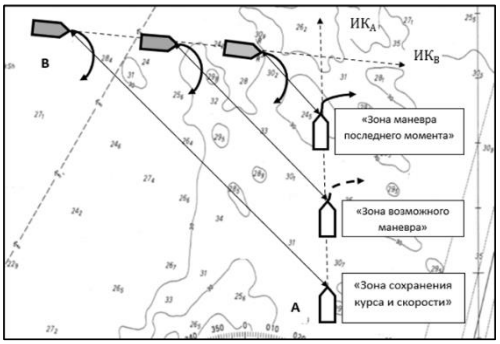


Рис. 1 Б – Траектории движения судов в ситуациях Правила 17 Действия судна, которому уступают дорогу

Подтверждением выполнения Правила 14 является момент начала маневра предпринимаемый судном-целью ($T_м$) (момент разладки). Принимая решение о расхождении необходимо учесть, что правило 14 применяется к обоим судам, оба судна обязаны предпринимать действия для расхождения.

Более сложная ситуация при расхождении двух судов возникает по Правилу 17 (рис. 1Б). Основные проблемы, связанные с выполнением алгоритма действий, заключаются в мониторинге движения судна-цели, определении этапов сближения судов и «момента последнего маневра». Алгоритм действий в ситуации Правила 17 МППСС-72, состоит в следующем:

1) привилегированному судну другое судно должно уступить дорогу, при этом – привилегированное судно должно сохранять свой курс и скорость;

2) в соответствующий момент оно, если это целесообразно, может предпринять самостоятельное действие для расхождения;

3) при последующем сближении оно должно в случае необходимости осуществить «маневр последнего момента» для предотвращения столкновения.

Основными параметрами, которые определяют каждый этап опасности сближения судов по Правилу 17, является: расстояние между судами $-S_м$, скорость сближающихся судов - $V_{отн}$, курсовой угол наблюдаемого судна – (КУ) и время сближения $-(ТСР)$.

При выполнении Правила 17 рассматриваемые параметры для осуществления маневра с расхождением на расстоянии (D_i) на том или ином этапе принятия решений требуют оценки. При этом алгоритм Правила 17 на каждом из трех этапов сближения судов может привести к одному из трех возможных исходов $(Г)$:

$$Г = \{Г_1, Г_2, Г_3\}, \quad (1)$$

причем каждый исход имеет определенную вероятность расхождения на (D_i):

$$D_i = D_{безопасное} \vee D_{кратчайшее} \vee D_{чрезмерное}. \quad (2)$$

Таким образом, для принятия решения по алгоритмам Правил 14 и 17 мы должны располагать множеством численных параметров, описывающих ситуацию сближения судов.

Задача обнаружения изменений в движении судна-цели от первоначальных наблюдаемых параметров локсодромического курса и скорости $(К_{л,}\ V_л)$ с целью расхождения на расстоянии (D_i) в настоящее время является одной из наиболее актуальных при разработке Систем автоматического мониторинга и контроля (САМК) МАНС. Обычно данная задача трактуется как задача обнаружения спонтанного изменения характеристик (разладки) стохастических сигналов $(Θ)$(временных рядов) в момент времени $(T_м)$.

Анализ нестационарных ВР АИС

Отличительной особенностью ВР АИС является - получение одномерных временных рядов широты $(\varphi_ц)$ и долготы $(\lambda_ц)$ судна-цели, когда в каждый момент времени измеряется только одна величина. Курс $(COG_ц)$ и скорость $(SOG_ц)$ не передаются напрямую, а рассчитываются принимающей станцией на основе последовательных сообщений, содержащих точные координаты и точное время фиксации.

Точность расчетов $COG_ц$ и $SOG_ц$ напрямую зависят от точности GPS/ГЛОНАСС приемника на борту судна, передающего координаты. Некоторые АИС могут применять простые алгоритмы усреднения или фильтрации к последовательным расчетам $COG_ц$/ $SOG_ц$, чтобы сгладить мелкие скачки широты $(\varphi_ц)$ и долготы $(\lambda_ц)$, но базовый принцип расчета COG/ SOG - между двумя метками времени двух сообщений - остается прежним.

Таким образом если рассматривать одномерные ряды АИС во взаимосвязи, когда в каждый момент времени измеряются сразу несколько величин, то в этом случае имеется возможность извлечения большей информации из множества одномерных ВР АИС.

Сопровождение по координатам судна-цели и определение момента начала его маневра $(T_м)$ можно выполнять по графикам ВР АИС (рис.2).

Для правильной оценки движения в ситуациях предупреждения столкновений судов (Правил 14 и 17) необходимо вести наблюдение за множеством параметров существования опасности столкновения и сближения судов, а также требуется определить момент перехода стационарного ВР наблюдений АИС в нестационарный ВР, т.е. *момент разладки* [6,7].

На рисунке 2 покажем ВР АИС изменения курса судна-цели $(COG_ц)$ в зависимости от времени.

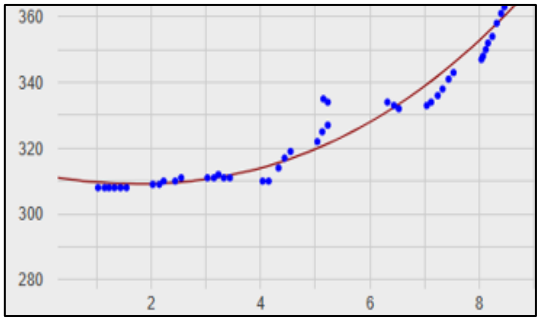


Рис.2 – ВР изменения курса судна $(COG_ц)$

Линейное движение скачкообразно переходит в нелинейное при кладке руля в некоторый момент времени (t_i). Такой переход будет свидетельствовать о том, что судно-цель начало маневрирование курсом $COG_ц$.

Хорошо, когда разладка наступает скачкообразно и ее легко определить по графику ВР АИС. Под таким скачкообразным изменением параметров движения будем понимать *момент разладки* наблюдаемого процесса $(Θ)$, т.е. переход из одного состояния судна в другое.

Хорошим индикатором изменения курса маневрирующего судна $COG_{ц,}$ является угловая скорость $(\Omega_ц)$ пригодная для анализа траектории маневрирующего (по циркуляции) судна (рис.3).

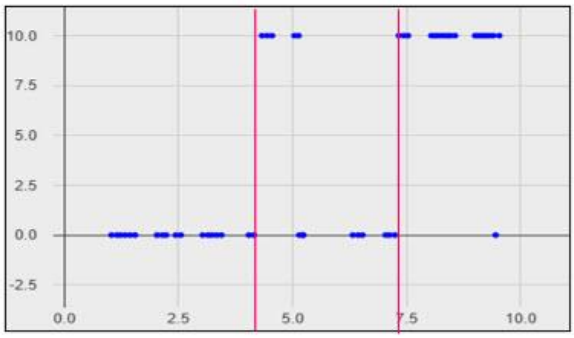


Рис. 3 – ВР значения угловой скорости цели $(\Omega_{ц})$

На графиках ВР АИС рисунков 2 и 3 показаны скачки изменения курса судна $COG_{ц}$ и совпадающие по времени значения угловой скорости $\Omega_{ц}$. При кладке руля угловая скорость $\Omega_{ц}$ изменяется достаточно быстро. Поэтому изменение курса судна $COG_{ц}$ легко обнаруживаются, сопоставляя ВР $COG_{ц}$ и $\Omega_{ц}$ в одни и те же моменты времени.

При анализе ВР АИС угловой скорости $\Omega_{ц}$ следует учитывать, что согласно правилу 19, V главы конвенции СОЛАС-74 для судов, валовой вместимостью 50 тыс. *рег.т.* и более, становится обязательным указатель скорости поворота судна (УСП), который относится к датчикам угловой скорости (ДУС). Графики (рис.2,3) получены в ходе эксперимента на судне-наблюдателе, где было установлено оборудование (Tron TR-8000 AIS system Jotron) компании Kongsberg. Особенностью этого оборудования является индикация значения угловой скорости только при $\Omega_{ц} > 10^{0}$ в реальном времени (рис. 3). Поэтому изменения $\Omega_{ц}$ на рисунке 3 имеют скачкообразный характер.

В общем случае ВР АИС представляют собой совокупности числовых значений, относящихся к дискретным моментам времени, причем каждому моменту времени соответствует лишь один отсчет во ВР (рис. 2-6). Однофакторные модели можно использовать, когда нужно спрогнозировать значения одной переменной, особенно если для этой переменной имеется достаточное их количество за некоторый период наблюдений (рис. 2).

Для более сложных задач прогнозирования движения судна-цели, в которых могут влиять несколько переменных или внешних факторов, используются методы многомерного прогнозирования. Эти модели учитывают несколько переменных и их взаимодействие для составления прогнозов. Если рассматривать взаимосвязь двух факторов (x^1) и (x^2), то двухфакторную модель ВР АИС можно записать как:

$$\{(x_1^1, x_2^1, \dots, x_k^1), (x_1^2, x_2^2, \dots, x_k^2)\}, \quad (3)$$

где k — количество измерений.

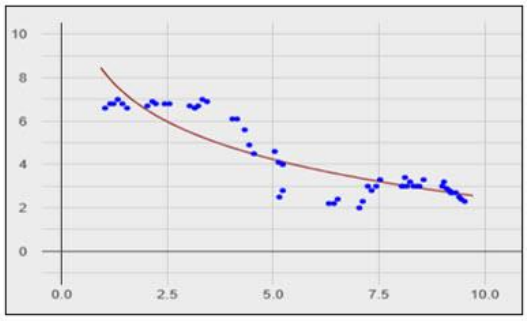


Рис.4 – ВР изменение скорости (торможение) $(SOG_{ц})$

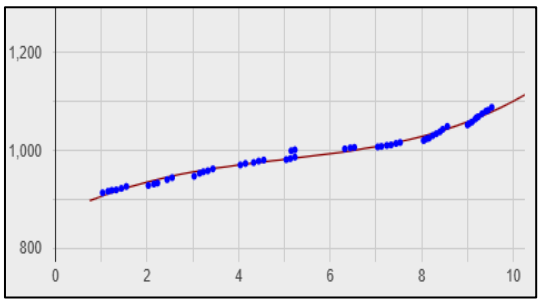


Рис. 5 – ВР изменения широты $(\varphi_{ц})$

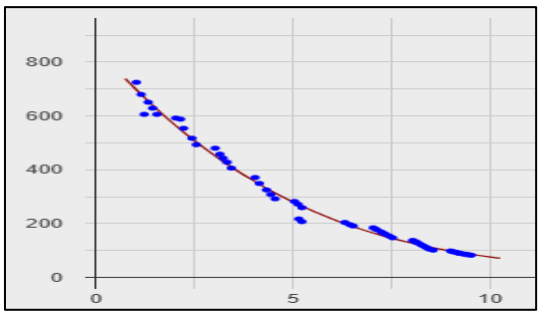


Рис.6 – ВР изменения долготы $(\lambda_{ц})$

Например, анализ двухфакторной модели $(COG_{ц}, \Omega_{ц})$ по скачкам графика ВР $\Omega_{ц}$ позволяет получить дополнительную информацию, по которой легко определить момент начала поворота $COG_{ц}$ судна-цели (рис. 2 и 3). Двухфакторные модели позволяют по одномерным рядам широты $(\varphi_{ц})$, долготы $(\lambda_{ц})$ с учетом влияния внешних факторов строить траекторию движения судна-цели (трекинг) (рис.7).

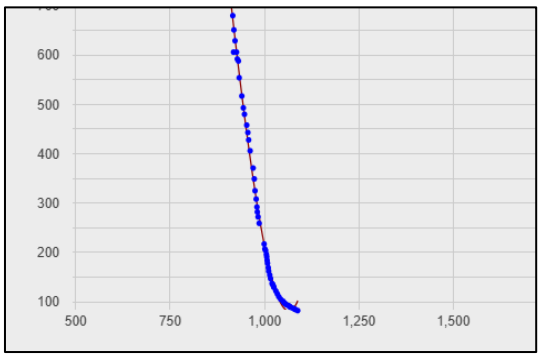


Рис.7 – ВР обсерваций места судна-цели

Однако при маневрировании скоростью (торможение/разгон) (см. рис. 4) такого хорошего

индикатора нет. Поэтому индикация разладки, т.е. при торможении или наборе скорости судна $SOG_{\text{ц}}$ четко не прослеживается ни по графикам ВР изменения широты $(\varphi_{\text{ц}})$, долготы $(\lambda_{\text{ц}})$ или обсервованного места судна-цели (см. рис. 5, 6 и 7). В данном случае задача обнаружения разладки (θ) ВР в случае маневрирования скоростью заключается в отнесении наблюдаемых в момент времени t_i или на некотором фиксированном интервале времени $[t_1, t_\Theta]$ параметров одномерных ВР АИС к некоторому классу состояний судна-цели в режиме реального времени и обнаружения изменений в его движении:

$$x_1, x_2, \dots, x_n, x_\theta, x_{\theta+1}, \dots, \dots. \quad (4)$$

где θ - неизвестный момент разладки.

где θ - неизвестный момент разладки.

Для решения такой задачи можно использовать последовательный критерий Вальда. Рассмотрим две гипотезы: основная $\mathcal{H}0$ и альтернативная $\mathcal{H}1$, соответствующие двум различным режимам движения судна-цели. Требуется по данным измерений определить, была ли смена режима движения на заданном интервале наблюдения. Рассмотрим возможность изменения режима движения на интервале $t_i \in [t_0,\ t_N]$. Вычисление отношения правдоподобия начинается в момент $t = t_0$, когда момент изменения режима движения $t_к$ неизвестен. Метод с использованием последовательного критерия Вальда заключается в вычислении логарифмической функции отношения правдоподобия λ_k и сравнением ее значений с верхним $A = \ln((1-\xi)/\varepsilon)$ и нижним $B = \ln(\xi/(1-\varepsilon))$ порогами решающего правила, где ε и ξ – вероятности ошибок первого и второго рода. Последовательное решающее правило для различия двух гипотез запишем в виде:

$$\begin{cases} \text{Если } \lambda к \geq \text{A, тест завершают выбором } \mathcal{H}1, \\ \text{Если } \lambda к \leq \text{B, тест завершают выбором } \mathcal{H}0, \\ \text{Если A} > \lambda к > \text{B, наблюден. продолжают.} \end{cases} \quad (5)$$

Последовательный критерий отношения правдоподобия требует вычисления отношения правдоподобия λ_k в каждый дискретный момент времени t_k. Изменение режима движения считается обнаруженным и идентифицированным после пересечения соответствующим значением отношения правдоподобия порогового значения решающего правила.

Оценивая визуально движение судна-цели по графикам на рисунках 2-7 можно охарактеризовать ВР АИС $[t_0, T]$ на некоторых интервалах времени $[\Delta t_i]$ как стационарные, а на интервалах $[\Delta t_\theta]$ как нестационарные.

Анализ стационарных ВР мы подробно рассматривали в [4] при описании линейной модели движения для целей сопровождения за судном-целью при выполнении Правил 13 и 15 для подтверждения требования «следовать своим курсом и скоростью».

В отличие от Правил 13 и 15 в Правилах 14 и 17 выдвигаются другие алгоритмические требования: следует маневрировать «как курсом, так и скоростью», а действия определяются нечеткими лингвистическими переменными: «изменить свой курс вправо» (Правило 14) или, например, «предпринять действие, чтобы избежать столкновения» (Правило 17). Маневрируя для избежания столкновения, движение судна-цели становится нелинейным и описывается нестационарными ВР. Кроме того, следует учитывать, что общими причинами нестационарности ВР могут быть: мореходные качества самого судна (ходкость, управляемость, мореходность), влияние погодных условий (волны, ветер, течения), технический регламент приема/передачи динамической информации АИС и др.

Общее определение *нестационарного ВР АИС* означает, что статистические свойства ВР (такие как среднее значение, дисперсия, автокорреляция и др.) изменяются во времени. Визуально это подтверждается на графиках рисунков 2-7. На рисунке 2 отчётливо видно, что значение $COG_{\text{ц}}$ изменяется со временем, что приводит к четко выраженному тренду изменения курса судна. Переходя к рисунку 4, видно, что в этом ряду изменяется дисперсия ряда $SOG_{\text{ц}}$ при торможении судна. На рисунках 5-7 видно, что разброс обсерваций места судна-цели становится меньше по мере увеличения времени, а значит, в рассматриваемом случае ковариация (связь между параметрами) - является функцией времени.

В [2] показано, что ВР АИС можно разделить на равномерные и *неравномерные* (эквидистантные и неэквидистантные). Во всех наблюдениях (рис. 2-7) значения переменных АИС выдаются через неравные промежутки времени. Анализ показывает, что дискретность параметрических наблюдений ВР по АИС при маневрировании по рисункам 2-7 определяется, как:

$$\Delta t_0 = t_{i+1} - t_i = random. \quad (6)$$

Отсюда попытки получить результаты наблюдений АИС на практике с дискретностями наблюдений, описанных в стандартах [8,9,10] в режиме онлайн не имели успеха. На рисунках 2-7 видно, что ВР АИС по параметру дискретности выдачи динамической информации не соответствуют ни одному из этих стандартов.

Принятие решения в быстроразвивающейся ситуации сближения судов по Правилам 14 и 17 протекает в режиме реального времени. Поэтому при обработке информации АИС возникает вопрос *длины нестационарного ВР*, получаемого в режиме реального времени.

При определении длины ВР АИС, с целью предупреждения столкновения необходимо прежде всего рассмотреть особенности процесса сближения судов и учитывать требования Правила 8 *Действия для предупреждения столкновения.* Правила требуют, что такое действие должно быть своевременным по обнаружению и заблаговременным для принятия действий по расхождению.

Оборудование АИС позволяет своевременно обнаруживать и получать динамическую информацию в среднем на расстоянии 20-30 морских миль при стандартных условиях среды и высоте установки антенны 15 метров над уровнем моря.

Однако на работу АИС могут влиять атмосферные условия такие как сверхрефракция и субрефракция, которые изменяют распространение радиоволн АИС увеличивая или уменьшая дальность связи. Оба явления могут привести к сбоям и потере

информации. В этом случае, подходы направленные на повышение надежности информации, должны включать дополнительные информационные системы или компоненты, которые могут взять на себя функции получения динамической информации о движении судов в данном районе плавания (резервирование). Важно отметить, что выбор метода резервирования зависит от времени достаточного для активации резерва. Скорее всего резерв должен активироваться автоматически при обнаружении потери информации (теплое резервирование), переключаясь на резервный сервер через САМК. Но могут быть использованы и другие методы резервирования, например: горячее резервирование, когда резервные системы активны и работают параллельно с АИС. В любом случае временной диапазон переключения на резервный источник должен быть минимальным.

Определение заблаговременности действий (начала дистанции маневра) для предупреждения столкновений должно исходить прежде всего: из условий плавания и маневренных возможностей судов. Хорошая морская практика рекомендует предпринимать действия сразу после обнаружения опасности столкновения. Однако в стесненных условиях при выборе дистанции начала маневра следует учитывать ограничения и обстоятельства, которые позволят значительно уменьшать обычные рекомендованные дистанции. При назначении длины ВР АИС следует учитывать также то обстоятельство, что процесс сближения судов на противоположных курсах при современных скоростях судов составляет в среднем 8-10 минут. Примерно такие же временные рамки существуют и для выполнения Правила 17.

На основании рассмотренных особенностей и ограничений процесса сближения судов выбор длины ВР сводится к выявлению локальных тенденций изменения ВР АИС и обработке их в достаточно сжатые сроки чтобы получить подробное понимание данных и сделать достаточно точные прогнозы. Хорошие результаты по обработке стационарных одноминутных ВР для целей предупреждения столкновения судов были нами получены в [4].

В [1,2] достаточно полно показана причина выбора *коротких ВР*. В режиме реального времени нас интересует не весь рассмотренный ВР наблюдений (ряд с длинной памятью), а для прогнозирования поведения судна-цели для предупреждения столкновения в режиме реального времени важно знать параметры кратчайшего сближения (CPA) и время (TCPA) сближения судов в конкретный момент (t_i) на каждом шаге дискретизации (Δt_i) (ряд с короткой памятью), а прошлые значения ряда малозначительны. Выявляя локальные тенденции изменения ВР, мы можем получить подробное понимание данных и сделать достаточно точные прогнозы.

Для *нестационарных неравномерных* ВР АИС особое значение приобретают методы обработки разновременных (неэквидистантных) ВР АИС вследствие изменения скорости судна-цели при маневрировании. Сюда же следует отнести данные с «пропусками значений» (рис 5,7) и другие аномалии ВР. Для таких рядов с целью обеспечения удобства обработки могут применяться процедуры «восстановления» пропущенных значений. Поэтому для нестационарных неравномерных ВР АИС одной из важнейших характеристик является дискретность отсчетов, определяемая величиной промежутков времени между данными, представленными во ВР АИС. Низкая дискретность может приводить к значительным потерям информации. Чрезмерно высокая дискретность может затруднять их обработку. Задача определения оптимальной частоты дискретизации на практике может быть решена прежде всего на основе обработки экспериментальных данных коротких неэквидистантных временных рядов при наличии аномалий. С другой стороны, возможно следует рассмотреть вопрос о применении плавающего характера частоты дискретизации ВР. Если опасности нет, то она может быть увеличена, а если «существует опасность столкновения», то она должна быть такой чтобы в кратчайшее время получить информацию о движении судна-цели.

Выбор и оценка качества полиномиальной модели

Выбор и оценка качества полиномиальной модели движения судна-цели включают два этапа: выбор степени полинома и оценку модели.

Степень полинома определяет сложность модели и её способность описывать нелинейные зависимости (рис. 8). Чем выше степень, тем более сложные зависимости можно моделировать. Слишком простая модель (низкая степень полинома) не уловит тренд (рис. 9 линейная модель показана красным цветом), а слишком сложная (высокая степень) начнет подстраиваться под случайный шум в обучающих данных.

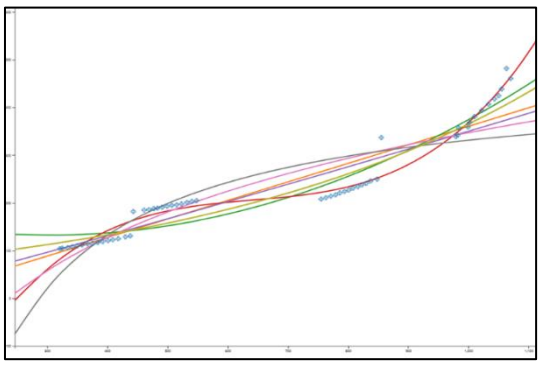


Рис.8 – Множество полиномиальных моделей ВР АИС

Для оценки качества полиномиальной модели используют следующие методы:

- **Коэффициент детерминации (R^2)**. Показывает, насколько хорошо модель объясняет вариацию данных. Значение R^2 лежит в пределах от 0 до 1, где 1 означает, что модель идеально объясняет все данные.
- **Стандартная ошибка регрессии**. Показывает, насколько точны предсказания модели.
- **Тесты на значимость коэффициентов**. Позволяют оценить, являются ли коэффициенты модели статистически значимыми.

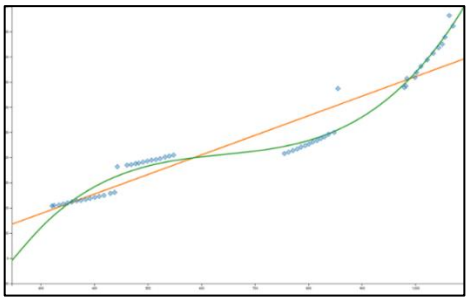


Рис.9 – Полиномиальные модели ВР АИС: линейная и кубическая

Прогнозирование нестационарных ВР АИС

Ранее в [1-5] мы отмечали, что для решения задачи сопровождения судов необходимо вести автоматический мониторинг за множеством параметров опасности столкновения и сближения судов, а также следует определить момент начала маневра судна-цели, т.е. переход стационарного ВР наблюдений АИС в нестационарный ВР («разладка»). Для оценки прошлых состояний по параметрам АИС за движением судна-цели за некоторый период наблюдений мы использовали методы сглаживания в режиме оффлайн.

Чтобы уметь прогнозировать будущее поведение судна-цели мы выполнили анализ и определили основные характеристики нестационарных неравномерных ВР АИС.

Для того чтобы узнать, какой или какие из методов прогнозирования в режиме реального времени можно использовать для рассматриваемых ВР необходимо учесть следующие особенности и ограничения:

- прогнозирование коротких неэквидистантных рядов в режиме реального времени требует сочетания скорости обработки, адаптивности к неравномерным интервалам и устойчивости к малому объему данных;
- прогнозы должны генерироваться мгновенно при поступлении параметрической информации;
- модель должна обновляться в режиме реального времени без полного переобучения;
- данные могут поступать с пропусками или артефактами (сбой датчиков);
- должны быть учтены ограничения по вычислительной мощности.

Прогнозирование коротких неэквидистантных рядов – сложная задача из-за малого количества наблюдений и неравномерных интервалов между ними. Такие данные отличаются ограниченным объемом, сложностью выявления паттернов при малой выборке, попаданию момента разладки между стационарными и нестационарными рядами.

Основная задача обработка данных и прогнозирование должны осуществляться «на лету» с низкой задержкой в режиме онлайн, без переобучения модели каждый раз.

Важно учитывать задержки. Если данные приходят с разными интервалами, система должна уметь обрабатывать их по мере поступления, не дожидаясь накопления определенного количества точек. Возможно использование скользящего окна или буфера последних наблюдений.

Также нужно подумать об оценке качества модели в реальном времени. Метрики должны вычисляться быстро, возможно использовать скользящие метрики или онлайн-валидацию.

Таким образом, прогнозирование коротких неэквидистантных рядов в режиме реального времени требует сочетания скорости обработки, адаптивности к неравномерным интервалам и устойчивости к малому объему данных.

Прогнозировать короткие неравномерные нестационарные ВР АИС достаточно сложно. Прогнозирование потребует специальных методов с учетом этих ограничений.

Выбор методов прогнозирования в режиме онлайн должен быть ориентирован на:

А / Легковесных статистических моделях.

В практике классического прогнозирования стационарных ВР можно использовать схемы экспоненциального сглаживания Р. Брауна [11-13], где прогноз строится на взвешенном среднем прошлых наблюдений с убывающими весами.

Экспоненциальное сглаживание временных рядов с полиномиальным трендом - один из способов краткосрочного прогнозирования временных рядов основан на выделении в нем тренда посредством некоторой процедуры рекуррентного сглаживания ряда. Этот подход позволяет учесть как последние наблюдения, так и тренд, описанный полиномом.

Б / Онлайн-версии классических алгоритмов.

Фильтр Калмана моделирует состояние системы и обновляет его при новых данных. В классическом виде может быть использован для моделей линейных ВР, для нелинейных используются такие расширения как Extended Kalman Filter (EKF) и Unscented Kalman Filter (UKF). Нелинейные фильтры Калмана являются мощным инструментом для обработки нестационарных нелинейных ВР в режиме онлайн, но требуют тщательной настройки и точности модели системы.

В итоге при обработке ВР АИС необходимо рассмотреть комбинацию методов: простые модели для быстрого прогноза, возможность онлайн-обучения, использование временных признаков и эффективные алгоритмы обработки.

Заключение

Для анализа нелинейных тенденций сопровождения судна-цели в ситуации предупреждения столкновений судов в статье рассматривается сближение в ситуациях Правил МППСС 14 Ситуация сближения судов, идущих прямо друг на друга и 17 Действия судна, которому уступают дорогу.

В некоторый момент времени судно-цель или оба судна должны предпринять действие для избежания столкновения, т.е. начать маневрировать курсом и (или) скоростью.

При этом сопровождение и контроль за выполнением действий по МППСС-72 осуществляется с помощью автоматического мониторинга ВР АИС, который по своей природе в общем нелинеен из-за влияния множества внешних и внутренних факторов.

Для предупреждения столкновений в ситуациях Правил 14 и 17 линейные модели ВР АИС не являются адекватными и не отражают процессы сопровождения и контроля начала, окончания маневра и возврата судна на прежний курс. Данные АИС (координаты, скорость, курс) часто

демонстрируют хаотическое поведение в моменты изменения скорости или при маневрировании. Наблюдаются аномалии ВР практически всех известных типов.

Особое значение приобретают методы обработки неэквидистантных ВР АИС вследствие изменения скорости судна-цели при маневрировании.

Выбор и оценка качества модели движения судна-цели включают два этапа: выбор степени полинома ВР и оценку модели. При выборе степени полинома ВР должен быть найден компромисс между сложностью модели и её способностью описывать нелинейные зависимости. Чем выше степень полинома, тем более сложные зависимости можно моделировать. Слишком простая модель (низкая степень полинома) не уловит тренд, а слишком сложная (высокая степень) начнет подстраиваться под случайный шум в обучающих данных. Для оценки качества полученной полиномиальной модели должны использоваться: коэффициент детерминации (R^2), стандартная ошибка регрессии и тесты на значимость коэффициентов.

На основании рассмотренного анализа процесса сближения судов выбор длины ВР сводится к выявлению локальных тенденций изменения ВР АИС и обработке их в достаточно сжатые сроки чтобы получить подробное понимание данных и сделать достаточно точные прогнозы, причем методы прогнозирования ВР АИС прежде всего должны быть «легковесными» и перестраиваться в момент разладки от линейных моделей к нелинейным моделям.

Поэтапный анализ нестационарных ВР АИС и моделей, представленный в данной статье, представляет собой метод пригодный для построения пространственно-временных алгоритмов сопровождения и прогнозирования движения МАНС в режиме реального времени и стать основным способом сопровождения и предупреждения столкновений судов в море

Литература

1. Астреин В.В., Кондратьев С.И., Боран-Кешишьян А.Л., Астреина Л.Б., Филатов В.И. Анализ информации АИС и моделей для построения пространственно-временных алгоритмов прогнозирования движения судов в море, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 159—170. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.020
2. Астреин В.В., Филатов В. И., Исследование динамической информации ГНСС и АИС для слежения и предупреждения столкновений судов, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 3 часть 1, С. 222—229. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.044
3. Астреин В.В, Филатов В.И. Навигационные системы и методы повышения их надежности и точности для решения задач предупреждения столкновений автономного судна на этапе разработки концепции, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 131—144. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.013
4. Астреин В.В., Астреина Л.Б. Филатов В.И. Исследование динамики линейных одномерных рядов АИС методами регрессионного анализа для сопровождения судна-цели, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 1 часть 1, С. 117—123. DOI 10.37220/MIT.2025.67.1.014.
5. Астреин В.В., Астреина Л.Б. Филатов В.И. Исследование линейной модели движения судна - цели по параметрам АИС, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 2 часть 1, С. 229—235. DOI: 10.37220/MIT.2025.68.2.028
6. Ширяев А. Н., Задача скорейшего обнаружения нарушения стационарного режима, Докл. АН СССР, 1961, том 138, номер 5, 1039–1042
7. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем: Пер.с англ. М. Бассвиль, А. Вилски, А. Банвенист и др.; Под ред. М. Бассвиль, А. Банвенист. – М.: Мир, 1989.-278 с., ил.
8. Стандарт МЭК 61993-2. Часть 2 «Судовое оборудование универсальной автоматической идентификационной системы (АИС) класса А. Технические и эксплуатационные требования, методы и требуемые результаты испытаний».
9. Резолюция ИМО MSC.74(69). Приложение 3 «Рекомендации по эксплуатационным требованиям к универсальной судовой АИС».
10. Рекомендации МСЭ-Р М.1371-1. «Технические характеристики универсальной судовой автоматической идентификационной системы (АИС), использующей множественный доступ с временным разделением в УКВ полосе частот морской подвижной службы».
11. Грешилов А.А., Стакун В.А., Стакун А.А. Математические методы построения прогнозов. - М.: Радио и связь, 1997.
12. Кендэл М. Временные ряды. - М.: Финансы и статистика, 1981.
13. Льюис К.Д. Методы прогнозирования экономических показателей. - М.: Финансы и статистика, 1986.

References

1. Astrein V.V., Kondratev S.I., Boran-Keshishyan A.L., Astreina L.B., Filatov V.I. Analiz informacii AIS i modelej dlya postroeniya prostranstvenno-vremennyh algoritmov prognozirovaniya dvizheniya sudov v more, [Analysis of AIS information and models for constructing spatio-temporal algorithms for forecasting ship movements at sea] Morskie intellektualnye tehnologii. 2024. № 1 chast 1, S. 159—170. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.020.
2. Astrein V.V., Filatov V. I., Issledovanie dinamicheskoj informacii GNSS i AIS dlya slezheniya i preduprezhdeniya stolknovenij sudov, [Research of dynamic GNSS and AIS information for tracking and collision avoidance of vessels] Morskie intellektualnye tehnologii. 2024. № 3 chast 1, S. 222—229. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.044
3. Astrein V.V, Filatov V.I. Navigacionnye sistemy i metody povysheniya ih nadezhnosti i tochnosti dlya resheniya zadach preduprezhdeniya stolknovenij avtonomnogo sudna na etape razrabotki koncepcii, Morskie intellektualnye tehnologii. 2023. № 3 chast 1, S. 131—144. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.013

4. Astrein V.V., Astreina L.B. Filatov V.I. Issledovanie dinamiki linejnyh odnomernyh ryadov AIS metodami regressionnogo analiza dlya soprovozhdeniya sudna-celi,[Navigation systems and methods for increasing their reliability and accuracy for solving the problems of collision avoidance of an autonomous vessel at the concept development stage] Morskie intellektualnye tehnologii. 2025. № 1 chast 1, S. 117—123. DOI 10.37220/MIT.2025.67.1.014.
5. Astrein V.V., Astreina L.B. Filatov V.I. Issledovanie linejnoj modeli dvizheniya sudna - celi po parametram AIS, [Study of the linear model of vessel movement - targets according to AIS parameters] Morskie intellektualnye tehnologii. 2025. № 2 chast 1, S. 229—235. DOI: 10.37220/MIT.2025.68.2.028
6. Shiryaev A. N., Zadacha skorejshego obnaruzheniya na rusheniya stacionarnogo rezhima,[The task of quickly detecting a violation of the stationary regime] Dokl. AN SSSR, 1961, tom 138, nomer 5, 1039–1042
7. Obnaruzhenie izmeneniya svojstv signalov i dinamicheskih system [Detection of changes in the properties of signals and dynamic systems]: Per.s angl. M. Bassvil, A. Vilski, A. Banvenist i dr.; Pod red. M. Bassvil, A. Banvenist. – M.: Mir, 1989.-278 s., il.
8. Standart MEK 61993-2. Chast 2 «Sudovoe oborudovanie universalnoj avtomaticheskoj identifikacionnoj sistemy (AIS) klassa A. Tehnicheskie i ekspluatacionnye trebovaniya, metody i trebuemye rezultaty ispytanij»[Shipborne equipment of the universal automatic identification system (AIS) class A. Technical and operational requirements, methods and required test results].
9. Rezolyuciya IMO MSC.74(69). Prilozhenie 3 «Rekomendacii po ekspluatacionnym trebovaniyam k universalnoj sudovoj AIS»[Recommendations on operational requirements for universal shipborne AIS].
10. Rekomendacii MSE-R M.1371-1. «Tehnicheskie harakteristiki universalnoj sudovoj avtomaticheskoj identifikacionnoj sistemy (AIS), ispolzuyushej mnozhestvennyj dostup s vremennym razdeleniem v UKV polose chastot morskoj podvizhnoj sluzhby»[Technical characteristics of a universal shipborne automatic identification system (AIS) using time division multiple access in the VHF maritime mobile band].
11. Greshilov A.A., Stakun V.A., Stakun A.A. Matematicheskie metody postroeniya prognozov[Mathematical methods for making forecasts]. - M.: Radio i svyaz, 1997.
12. Kendel M. Vremennye ryady.[Time series] - M.: Finansy i statistika, 1981.
13. Lyuis K.D. Metody prognozirovaniya ekonomicheskih pokazatelej.[Methods of forecasting economic indicators] - M.: Finansy i statistika, 1986.

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

Астреин Вадим Викторович —доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова» 353918, Российская Федерация, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93. e-mail: astrein-vadim@rambler.ru..

Vadim V. Astrein — Doctor of Technical Sciences, Professor Admiral F. F. Ushakov State Maritime University 93, Lenin Avenue, Novorossiysk, 353918, Russian Federation. e-mail: astrein-vadim@rambler.ru.

Кондратьев Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор ФГБОУ Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова 53918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. e-mail: pcom@aumsu.ru

Sergey I. Kondratiev Doctor of Technical Sciences, Professor Admiral F. F. Ushakov State Maritime University 93, Lenin Avenue, Novorossiysk, 353918, Russian Federation. e-mail: pcom@aumsu.ru

Астреина Людмила Борисовна, кандидат географических наук, доцент ФГБОУ Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. e-mail: astreina-ludmila@gmail.com

Liudmila B. Astreina, Candidate of Geographical Sciences, assistant Professor Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. e-mail: astreina-ludmila@gmail.com

Филатов Виктор Иванович - кандидат технических наук, доцент ФГБОУ Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова 53918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. e-mail: Filatov_viktor1994@mail.ru

Victor I. Filatov, Candidate of Technical Sciences, assistant Professor Admiral F. F. Ushakov State Maritime University 93, Lenin Avenue, Novorossiysk, 353918, Russian Federation e-mail: Filatov_viktor1994@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 29.05.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.06.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 22.06.2026.

Научная статья
УДК 629.127/004
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.050

Анализ и синтез метода многорежимного управления морскими технологическими комплексами

Данцевич И.М.[1] dantsevich.aumsu@gmail.com, **Лубенцов В.Ф.**[2] vf.lubentsov@yandex.ru
[1]Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, [2]Кубанский государственный технологический университет

Аннотация. В данной работе рассмотрены вопросы построения многорежимных регуляторов систем автоматического управления морскими технологическими комплексами. Сложность построения регуляторов обусловлена нестационарностью процессов функционирования забортного оборудования, необходимостью удержания позиции судна-носителя, а также реализации принципов стабилизации раскачивания находящегося за бортом оборудования. Рассмотренные методы показали, что наилучшее соответствие требованиям реализации системы автоматического управления обеспечивает построение интеллектуальной гибридной системы управления. Вычислитель такой системы предлагается сделать на базе цифрового интерполятора функции управления компенсатором спуск-подъёмных манипуляций системы. Работа такого вычислителя состоит в применение процедуры трешолдинга, который позволяет вычислять настроечные коэффициенты регуляторов с децимацией (понижение порядка системы) и интерполяцией (повышение порядка системы). Предложенный подход обеспечивает построение регуляторов, базирующихся на численных моделях процессов компенсации динамики забортного оборудования. Таким образом, разработанный метод обеспечивает реализацию многорежимных регуляторов на основе численного моделирования процессов компенсации динамики забортного оборудования судов-носителей.
Ключевые слова: анализ, синтез, многорежимное управление, морские технологические операции, системы автоматического управления, цифровой интерполятор, всплеск, разложение.
Для цитирования: Данцевич И.М., Лубенцов В.Ф., Анализ и синтез метода многорежимного управления морскими технологическими комплексами, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 222—230. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.050

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.050

Analysis and synthesis of the method of multi-mode control of marine technological complexes

Igor M. Dantsevich[1] dantsevich65@mail.ru, **Valery F. Lubentsov**[2] vf.luentsov@yandex.ru
[1]Admiral Ushakov Maritime State University, [2]Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

Abstract. This paper discusses the construction of multi-mode regulators of automatic control systems for offshore technological complexes. The complexity of building regulators is due to the non-stationarity of the operational processes of the onboard equipment, the necessity of maintaining the position of the carrier vessel, as well as the implementation of principles for stabilising the rolling of the equipment located overboard. The methods discussed have shown that the best compliance with the requirements for implementing an automatic control system can be achieved by developing an intelligent hybrid control system. It is proposed that the computation for such a system be based on a digital interpolator for the control function of the compensator for the lowering-raising manipulations of the system. The operation of this computational unit involves the application of a thresholding procedure, which allows for the calculation of tuning coefficients for regulators with decimation (reducing the order of the system) and interpolation (increasing the order of the system). The proposed approach ensures the construction of regulators based on numerical models of the dynamics compensation processes of the onboard equipment. Thus, the method that has been created makes sure that multi-mode regulators are implemented that utilize numerical modeling of processes to deal with the dynamics of loading equipment on carrier vessels.
Keywords: state observer, immeasurable disturbances, transient process, automatic control system, synthesis of control actions.
For citation: Igor M. Dantsevich, Valery F. Lubentsov, Analysis and synthesis of the method of multi-mode control of marine technological complexes. Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 222—230. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.050

Введение

Важнейшей проблемой многорежимного управления является в формировании и валидации управляющих сигналов, соответствующих критериям качества адаптивного управления, которые формируются на основе наблюдаемых характеристик системы [1].

Первоочередной задачей является разложение процесса функционирования системы автоматического управления на отдельные режимы с разработкой для каждого из них специфического локального критерия управления. Рассматриваемая

© Данцевич И.М., Лубенцов В.Ф. 2026

проблема остается недостаточно исследованной в области изучения системных объектов и требует решения в рамках концепции многорежимного управления.

Принцип многорежимности предполагает создание формализованного подхода, который позволяет синтезировать для каждого режима соответствующий локальный закон управления [2].

К объектам исследования с многорежимными алгоритмами функционирования, требующими реализации многорежимного регулирования при смене режимов, относятся:

– морские технологические комплексы;

– спускаемые подводные аппараты в условиях открытого моря;

– транспортные морские объекты;

– технические системы с электроприводами;

Организация морскими технологическими операциями связано с необходимостью эффективного управления судном-носителем технологического оборудования и собственно самим забортным комплексом. Разработка регуляторов морских технологических комплексов заборного оборудования связана со сложными условиями работы и требованиями точности позиционирования морских судов и забортного оборудования [3].

Применение подводных аппаратов различного назначения связано с необходимостью обеспечения ряда важных технологий, прежде всего таких, как:

– оснащение судна-носителя подводных аппаратов системой динамического позиционирования, обеспечивающей удержание заданного положения судна методами активного управления судового комплекса;

– использование на судах-носителях подводных аппаратов систем компенсации качки, приводов лебёдок-компенсаторов, гиростабилизированных платформ;

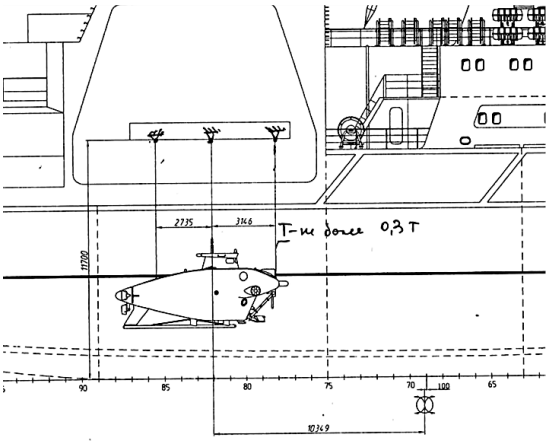
– систему передачи энергии на забортное оборудование через буксировочный кабель-трос;

– конструкция забортного оборудования (включая обитаемые и необитаемые аппараты) должна предусматривать системы компенсации динамики при буксировке и спускоподъемных операциях.

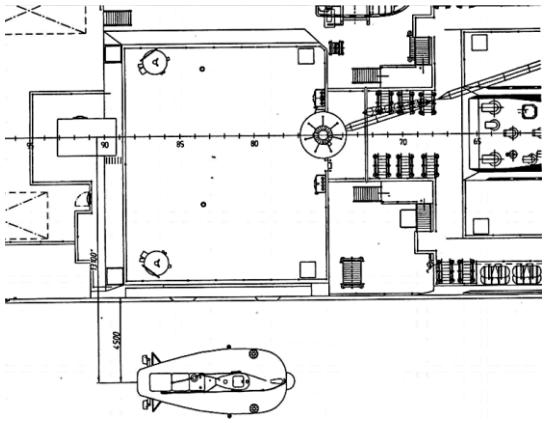
Специфической особенностью использования технологического комплекса эксплуатации забортного комплекса автономного глубоководного аппарата (ГА «Русь»), является многофазность и, как следствие, многорежимность системы управления, обеспечивающей процессы выборки или травления тросов подвесной системы, а также перемещение регулирующих натяжение тросов гидравлических кареток.

Помимо регулировки усилий в тросах и скорости перемещения кареток, необходимо применение методов стабилизации курса судна и влияния ветро-волновых возмущений на сам аппарат. Учитывая, нерегулярный характер волнения моря, характеризующий «пакетную» структуру, задачи разработки регуляторов требуют решения нескольких подзадач.

Технологическая схема спуск-подъёмных операций показана на рисунке 1. Указанные технологические операции выполняются персоналом внутри комплекса.



а) фронтальный вид, подвес на трёх точках



б) вид сверху, расстояние между бортом судна и корпусом опускаемого подводного аппарата

Рис. 1. Технологическая схема спуска-подъёма забортного технологического оборудования (обитаемый аппарат типа «Русь»)

Структурная схема технологического комплекса забортного оборудования показана на рисунке 2.



Рис.2. Структурная схема технологической судовой системы забортного оборудования

Анализ условий реализации технологических процессов, представленных на рисунках 1 и 2, учитывает неопределенности, проявляющиеся в рабочих режимах оборудования.

Основными принципами построения САУ для таких процессов в условиях неопределенности являются следующие системы: со скользящим режимом работы [4-6], адаптивные [7-11], робастные [12-14], интеллектуальные [15-18], гибридные с использованием набора информативных признаков, комплексного анализа гидродинамики и энергетики, а также формируемой динамики скоростных реакций пилота, полученных по его когнитивным спектральным оценкам динамики [3;19].

С учетом изложенного в таблице 1 приведены методы и краткая их характеристика для построения многорежимных систем управления объектами и процессами.

Метод	Достоинства	Недостатки
Линейное управление	Простота процедур синтеза. Наличие методик синтеза регуляторов семейства ПИД-регуляторов. Низкие вычислительные затраты.	Синтез осуществляется по линейным моделям объекта. Не гарантируются быстродействие, точность и устойчивость системы при многорежимном управлении. Типовые линейные регуляторы являются однорежимными.
Управление с преднамеренным введением скользящего режима	Робастность к параметрическим возмущениям. Простота структуры.	Требуемая высокая частота переключений ограничивается наличием инерционностей исполнительных устройств. запаздыванием, люфтов, зазоров и других неидеальностей звеньев системы.
Адаптивное управление	Адаптация к действию возмущений и влиянию параметрической неопределенности объекта.	Требуется синтез дополнительных каналов для проведения сигнальной и (или) параметрической настройки регулятора. Вычислительная сложность алгоритмов управления и настройки регуляторов.
Робастное управление	Допускается использование интервальных моделей объектов управления в. Простота синтеза настроек регулятора.	Требуется определение моментов переключения режимов. Не гарантируется высокое быстродействие и точность при последовательной смене режимов функционирования системы.
Нелинейное управление на основе сигма-функций	Отсутствуют разрывные управления в процессе функционирования объекта управления.	Не гарантирует высокой точности при переходе к установившемуся режиму.
Нейросетевое управление	Способность автоматического обучения и получения решения, не заложенного априори при разработке.	Вычислительная сложность алгоритмов управления. Отсутствуют рекомендации по выбору нейронной сети минимальной сложности. Процесс обучения НС может оказаться крайне медленным.

Нечеткое управление	Возможность применения априорных знаний людей-экспертов для систем с неопределенностями при отсутствии моделей объектов управления.	Необходимость разработки базы правил и определения процедур фаззификации и дефаззификации. Корректность формирования базы правил зависит от компетентности специалистов.
Интеллектуальное гибридное управление на основе сочетания аппроксимирующего и нечеткого управлений.	Не требуются модели объектов управления. Возможность обеспечения быстродействия и точности в режимах функционирования, последовательно следуемых друг за другом при неизвестных заранее моментах смены режимов. Несложные вычислительные процедуры.	Отсутствие рекомендаций по выбору структуры системы, настроек параметров алгоритмов аппроксимирующего управления в разных режимах и обеспечению астатизма системы.
Многорежимное управление подвижными объектами по инвариантам модели объекта и влияющих факторов среды.	Не требуется внесения дополнительных воздействий на объект при наличии полного исчерпывающего набора признаков.	При отсутствии датчиков для измерения необходимой информации набор признаков, характеризующих текущее состояние объекта и состояние окружающей среды, будет неполным.
Управление подвижными объектами на основе комплексного анализа кинематики и динамики цифрового двойника.	Имеется возможность обобщения методов расчёта численными методами решающей обратной связи в регуляторах сил и моментов (скоростей в трёх ортогональных плоскостях) в зависимости от угла атаки, скоростного крена и рыскания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата при реализации различных типов движения и позиционирования.	Требуются специальные априори проведенные исследования гидродинамики. Ограниченность визуальных средств управления с дистанцией контроля 5-7 метров требует комплексирования средств визуального контроля и гидролокаторов.

Данные натурных экспериментов, для подвесных систем, показанных на рисунке 1, позволяют сформировать базу исследований операций компенсации качки судна, влияния ветро-волновых возмущений, а также компенсации динамических сил в тросах подвесной системы, как показано на рисунке 3.

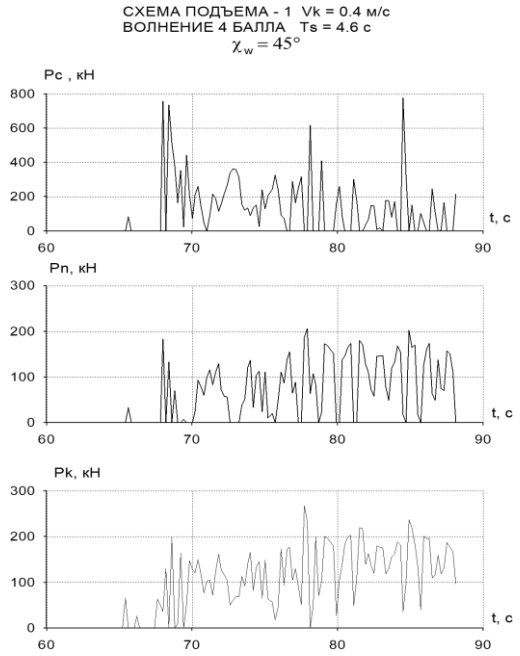


Рис. 3. Осциллограммы усилий в несущем P_c, носовом вспомогательном P_n и кормовом вспомогательном P_k тросах, при подъёме и спуске автономных глубоководных аппаратов типа «Русь»

Зависимости от углов крена $\boldsymbol{\theta}$, рыскания $\boldsymbol{\phi}$, дифферента $\boldsymbol{\psi}$, вертикального перемещения относительно судна $\boldsymbol{y_a}$ точки крепления несущего троса к аппарату и изменение вертикальной координаты ЦТ аппарата $\boldsymbol{y_g}$ показаны на рисунке 4.

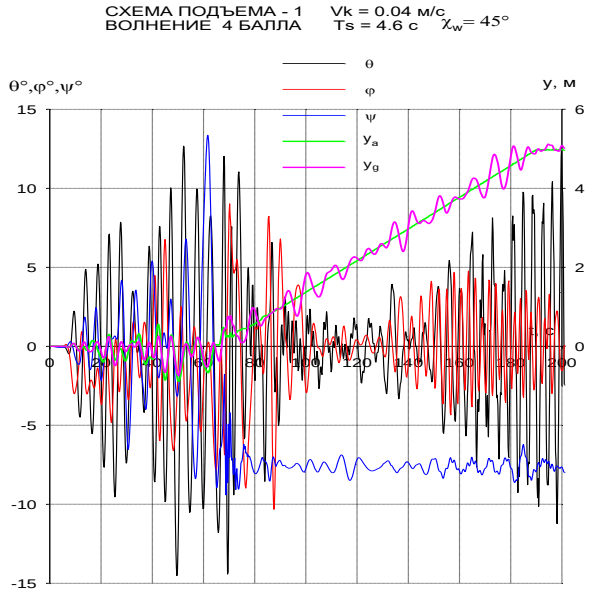


Рис. 4. Осциллограммы углов крена $\boldsymbol{\theta}$, рыскания $\boldsymbol{\phi}$, дифферента $\boldsymbol{\psi}$, вертикального перемещения относительно судна $\boldsymbol{y_a}$ точки крепления несущего троса к аппарату и изменение вертикальной координаты ЦТ аппарата $\boldsymbol{y_g}$ при подъёме и спуске автономных глубоководных аппаратов типа «Русь»

Как оказалось, лучшие результаты удаётся получить использованием комбинированных регуляторов, включая регуляторы классического типа и нечёткой логики, или нейросетевые и ПИД-регуляторы.

Например, комбинирование нечетких регуляторов с нелинейными регуляторами с аппроксимирующим управлением (РАУ) [10], упрощает настройку РАУ в разных режимах функционирования системы. Комбинирование нечетких регуляторов с системами, построенными на нейронных сетях, позволяет построить нейросетевые системы, в которых сочетание нечетких знаний о процессе с числовыми данными упрощает обучение нечеткого регулятора и сокращает время обучения нейронной сети.

Результаты

Задача управления устройствам компенсации качки и судовых спуск-подъёмных лебёдок за всю историю своего развития решалась как выбор режимов управления судном, обычно при выполнении операций всегда выбирается курсовой угол волнения (КУВ) 180^0 и применения регулируемых приводов лебёдок, с появлением технологии динамического позиционирования судов стыковка ГА и элементов системы упростилась.

Однако использование системы динамического позиционирования требует высокой квалификации персонала и желаемых условий взаимодействия ГА и судна, выполнение которых не всегда допустимо. В силу этих причин суда (геофизические, научные, специальные и т.д.), выполняющих технологические забортные операции оснащают компенсаторами качки. В простейшем случае это гидравлические каретки компенсирующие раскачивание системы в продольной и поперечной плоскости судна.

Гидравлические активные компенсаторы имеют каретки с полиспастами, приводимые в движение гидравлическими цилиндрами. Управляющий сигнал δ, в зависимости от знака изменяет давление в исполнительных цилиндрах, приводя положение точки подвеса забортной системы в нулевое положение.

Перемещение координаты точки подвеса $y_в$ в вертикальной плоскости вызванных качкой $y_к$, компенсируемая проекцией на перемещение поршня h.

$$y_в = y_к - h = 0. \quad (1)$$

Дифференциальное уравнение движения штока компенсатора:

$$M\frac{d^2h}{dt^2} + R\frac{dh}{dt} = P - P_{CT} + n(T - T_0) \quad (2)$$

где M – масса подвижных частей компенсатора (кг), R – коэффициент сопротивления перемещению штока (кг·с/м), P – сила давления масла на поршень компенсатора (Н), n – коэффициент кратности полиспаста компенсатора, T – натяжение кабель-троса на последнем ролике СПУ (Н), T_0 – среднее (статическое) значение натяжения на последнем ролике СПУ, P_{CT} - среднее (статическое) значение давления масла на поршень компенсатора.

Для условного компенсатора давление в исполнительных цилиндрах:

$$P = P_0 \cdot sign\delta \quad (3)$$

где P_0 – максимальная величина силы давления (Н).

Управляющий сигнал гидравлической системы $\delta(t)$ может быть записан в виде:

$$\delta(t) = y_k(t) + k_1 + \int_0^t (y_В - y_К(t))dt + k_2(T - T_0), \quad (4)$$

где $y_к$ - координаты перемещение в вертикальной плоскости, вызванной качкой, Т – натяжение кабель-троса на последнем ролике СПУ (Н), T_0 – среднее (статическое) значение натяжения на последнем ролике СПУ, h – перемещение поршня;

k_1, k_2 – настроечные коэффициенты, $T_Н^{доп}$ – постоянное максимально допустимое значение времени нарастания переходной функции $T_Н$ - в пусковом режиме.

Исследование телеметрии спуск-подъёмных операций показывает, что при аналитическом описании работы системы имеет место анализ быстро осциллирующих функций.

Классический анализ строится на варьировании значений коэффициентов k_1 и k_2 в ПИД регуляторах давления в системе [20], и фактически в значительной мере зависит от массы элементов системы, при этом удовлетворительные решения удаётся получить при определённых значениях КУВ и вида волнения (затухающее, развитое и т.д.). Особенность работы полиспастов заставляет учитывать меньшую величину обратного хода поршня, что заставляет учитывать вносимую нелинейность системы. Еще одной критической особенностью линейных систем является возникновение резонансных явлений, при которых усилие в тросах может в 3-5 раз превышать расчётные.

Определим, что $\delta(t)$ является функцией вещественной переменной, $\delta(t) \equiv 0$, при $t < 0$, формирование значений $|\delta(t)| \le Ae^{s_0 t}$, связано с параметрами амплитуды A и роста функции s_0.

Рабочая функция преобразования формируется по интегральным оценкам входных отсчётов датчиков контроля динамики ГА и системы компенсации качки.

Мультипликативное преобразование Лапласа, называемое преобразованием Меллина:

$$\delta(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \Delta(\sigma + j\omega)e^{(\sigma+j\omega)t}d\omega, \quad (5)$$

будем использовать для вычисления численных оценок рабочей функции $\delta(t)$.

Прямое и обратное преобразование Лапласа (включая преобразование Меллина) существует при выполнении ряда условий:

– в смысле абсолютной сходимости, существуют интервальные оценки:

$$\lim_{b\to\infty}\int_0^b |\delta(t)| \cdot e^{-\sigma_0 t}dt = \int_0^\infty |\delta(t)| \cdot e^{-\sigma_0 t}dt, \quad (6)$$

сходящиеся к оценке вида $\sigma \ge \sigma_0$, а $\sigma = Re(p)$ – действительная часть оператора p;

– существует интеграл $\int_0^\infty |\delta(t)|dt$ при вариациях переменной $\sigma \ge 0$;

– для $|\delta(t)| \le Ae^{s_0 t}$ при интервальных оценках $t > t_0 \ge 0$ и $t_1 > 0$.

Типовые звенья систем управления строятся на комбинации типовых интегралов известных функций с набором граничных условий, во всех остальных случаях необходима декомпозиция, анализ и синтез возможных вариаций типовых звеньев САУ. Как указано в таблице 1, такие варианты характерны при построении линейных систем, управление с преднамеренным введением скользящего режима, адаптивного и робастного управления.

Структурная схема цифрового интерполятора (звено интерполятора $W(z)$) содержит преобразователь (интерполятор нулевого порядка); четырёхканальный вычислитель, состоящий из цифровых фильтров, выполняющих прореживание по времени; формирователь всплеск-функции; звено формирования интерполирующей функции. Вычислитель сигнала управления (звено вычисления сигнала управления) содержит блок задержки на один такт, звено дополнения функции нулями и звено вычисления свёртки по модулю «2», как показано на рисунке 5.

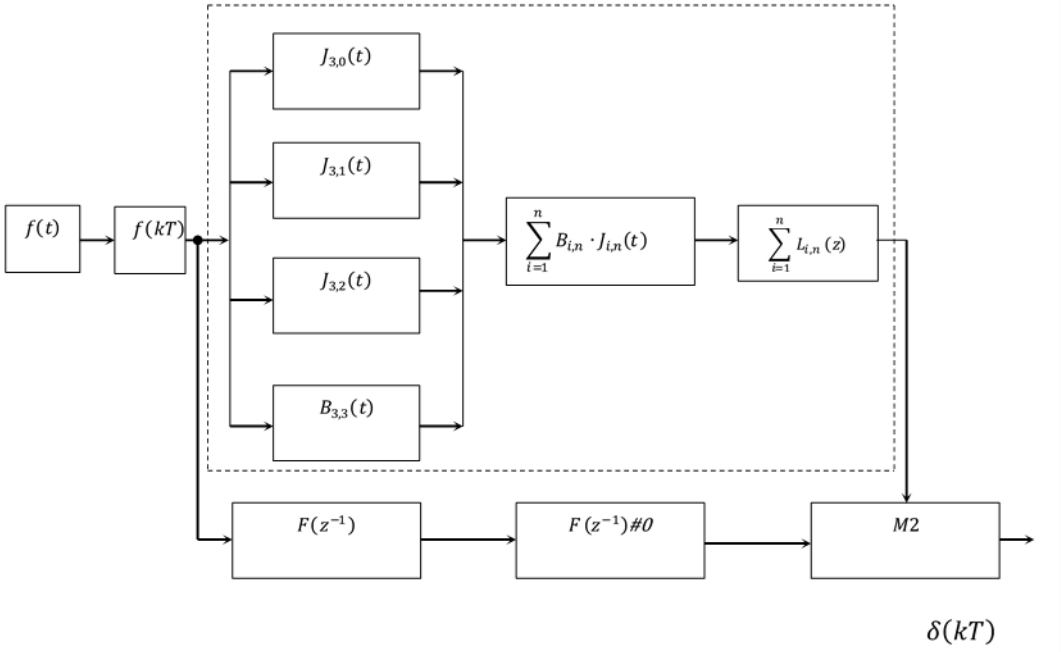


Рис. 5. Структурная схема цифрового интерполятора функции управления компенсатором спуск-подъёмной системы

Используя данные модели динамики забортной системы приведенной на рисунке 3 и измерения динамики судна при выполнении забортных операций вычислим сигнал управления системы компенсации качки. Моделирование реализовано стредствами программного комплекса Matlab.

Формирование сигнала управления системой компенсации происходит по наблюдаемым последовательностям привода лебёдок (натяжение тросов регулируется датчиками по предельным значениям), а также по динамике подвесной системы. Управляющим сигналом каретки послиспастов будет противофазный сигнал динамики подвесной системы и забортного оборудования. Вычисление свертки по «модулю два» сигналов управлвения и отсчётов с системы измерения динамики забортной системы (акселерометра) позволяет определить консолидированный компенсирующий сигнал, по результатам натурных измерений для условий показанных на рисунке 3.

На рисунке 6 приведены результаты вычисления динамики забортной системы и управления лебёдками с использованием цифрового интерполятора, моделирование выполнено средствами программного комплекса Matlab.

Улучшению качества работы компенсатора способствует:

– уменьшение массы подвижных частей компенсатора M;

– уменьшение коэффициента сопротивления перемещению поршня компенсатора R;

– увеличение максимальной величины силы давления на поршень компенсатора P_0;

– уменьшение времени запаздывания между моментом переключения клапанов и моментом достижения максимального значения давления на поршень $t_{ЗАП}$;

– повышение чувствительности системы переключения клапанов (уменьшение зоны нечувствительности «м»).

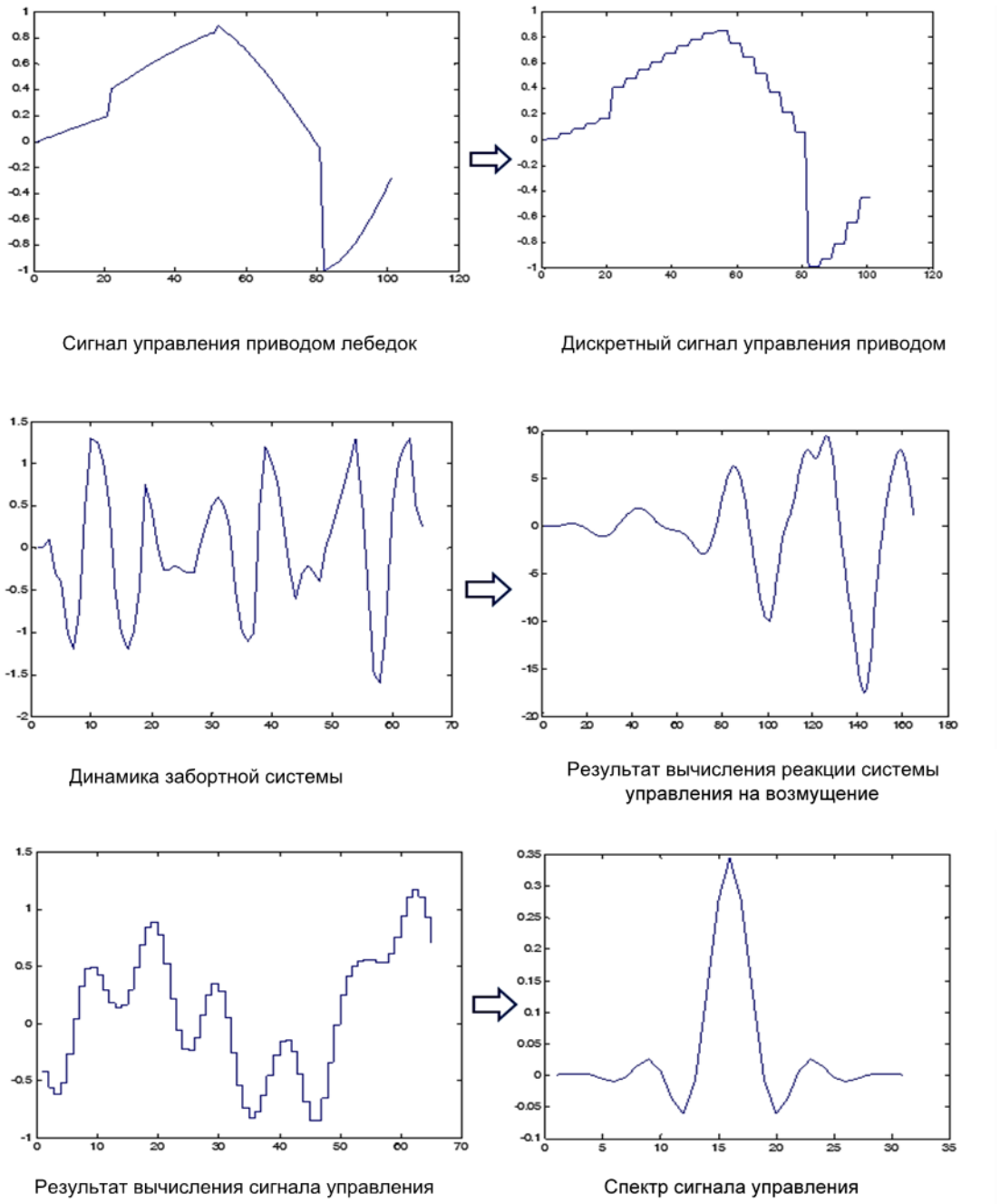


Рис. 6. Результаты вычисления динамики забортной системы и управления лебёдками с использованием цифрового интерполятора

При выполнении работы были рассмотрены условный активный компенсатор и система управления его работой.

При оптимальном подборе параметров компенсатора и его системы управления, активная система компенсации способна обеспечить допустимое качество стабилизации даже при волнении моря интенсивностью 5 баллов, минимизируя влияние судовой качки на динамику забортной подвесной системы.

Отметим, что в данной работе не учитывались возможные погрешности датчиков, измеряющих параметры качки СПУ. Вследствие этого сделанные выводы носят качественный характер и требуют проверки и уточнения после получения достоверных данных о характеристиках подвесной системы компенсатора и системы управления его работой.

Вывод

Полученные результаты позволяют отметить, что компенсация динамики забортного оборудования в условиях многорежимности его функционирования и неопределенности дают методы построения интеллектуальной гибридной системы управления, дополненные методами нейросетевой технологии и нечеткой логики.

Заключение

Реализация многорежимного автоматического управления морскими технологическими операциями на базе цифровых вычислителей (интерполяторов), использующих численные модели синтезируемых посредством интерполяции или децимации наборов коэффициентов всплеск-функций (вейвлетов). Критерии оценки формируются на базе процедуры трешолдинга с интегральной оценкой свёртки по модулю два.

Литература

1. Гайдук А. Р. Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 360 с.
2. Шахрай Е.А., Лубенцова Е.В., Лубенцов В.Ф. Многорежимные системы управления и особенности аппаратного и программного инструментария для их реализации. Современные наукоемкие технологии. 2021. № 3. С. 112-118.
3. Данцевич И. М. Морские интеллектуальные технологии. Адаптивное многослойное управление телеуправляемыми необитаемыми аппаратами. 2021. № 4-1 (54) С. 147-152.
4. Суворов, Д. А. Французова, Г. А. Применение скользящего режима в системах автоматического поиска экстремума. М.: Автоматика и программная инженерия. 2017, №2(20).
5. Дегтярев, Г.Л., Мещанов, А.С. Методы управления на скользящих режимах. Монография. Казань. Издательство Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ 2014. 104 с.
6. Ефимов А.А. Моделирование систем управления в скользящем режиме активным преобразователем тока. М.: Информационно-управляющие системы №2. 2018.
7. Лубенцова Е.В. Синтез адаптивной системы управления технологическим объектом с запаздыванием при неконтролируемых внешних возмущениях. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2003. № 9. С. 13-15.
8. Жмудь В. А. Адаптивные системы автоматического управления с единственным основным контуром. М.: Автоматика и программная инженерия. 2014, №2(8).
9. Zhiqiang, Gao Techniques in Reconfigurable Control System Design. Editor(s): Cornelius T. Leondes, Control and Dynamic Systems, Academic Press, Volume 79,1996, Pages 89-115.
10. Жмурко, Д. Ю. Понятие, сущность и классификация адаптивного управления системами с организационной сложностью. Краснодар. Научный журнал КубГАУ, №90(06), 2013 г.
11. Демин, А. В. Витяев, Е. Е. Логическая модель адаптивной системы управления. М.: Нейроинформатика. 2008, том 3, № 1. С. 79-107.
12. Borup, K. T., Fossen, T. I., & Johansen, T. A. (2016). A Nonlinear Model-Based Wind Velocity Observer for Unmanned Aerial Vehicles. In IFAC-PapersOnLine.Vol. 49, pp. 276–283.
13. Лубенцов, В. Ф., Лубенцова, Е. В., & Масютина, Г. В. Анализ и синтез робастных систем управления методом гарантируемой динамики. Современные проблемы и пути их решения в науке, производстве и образовании. 2018. (6), 7-9.
14. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Робастная коррекция в системах управления с большим коэффициентом усиления. Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. №. 12. С. 3-10.
15. Лубенцова Е.В., Петраков В.А., Слюсарев Г.В., Лубенцов В.Ф. Метод построения нечетких регуляторов с использованием аналитических выражений для управляющих воздействий. Фундаментальные исследования. 2015. № 11-3. С. 484-490.
16. I. Tomac, J. Slavič. Damping identification based on a high-speed camera, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 166, 2022, 108485, ISSN 0888-3270
17. Игнатьев, В. В., Курейчик, В. М., Спиридонов, О. Б., & Игнатьева, А. С. (2017). Метод гибридного управления на основе адаптивной системы нейро-нечеткого вывода. Известия Южного федерального университета. Технические науки, (9 (194)), 124-132.
18. Лютикова М. Н. Совершенствование управлением многоцелевым буксируемым комплексом с применением нейросетевого контроллера в асимптотике полиномов Бернштейна, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 153—159.
19. Данцевич И.М., Лубенцов В.Ф. Определение параметров гидродинамических коэффициентов в рабочих функциях управления телеуправляемых необитаемых аппаратов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 242—250
20. Лубенцова Е.В., Масютина Г.В., Рудакова Т.А., Лубенцов В.Ф. Синтез интервальной системы управления с адаптивным ПИД-регулятором. Автоматизация в промышленности. 2013. № 9. С. 62-64.

References

1. Gaiduk A. R. Theory and methods of analytical synthesis of automatic control systems (polynomial approach). Moscow: FIZMATLIT, 2012. 360 p.
2. Shakhrai E. A., Lubentsova E. V., Lubentsov V. F. Multi-mode control systems and features of hardware and software tools for their implementation. Modern science-intensive technologies. 2021. No. 3. P. 112-118.
3. Dantsevich I. M. Marine intelligent technologies. Adaptive multilayer control of remotely operated unmanned vehicles. 2021. No. 4-1 (54) P. 147-152.
4. Suvorov, D. A. Frantsuzova, G. A. Application of sliding mode in automatic extremum search systems. M.: Automation and Software Engineering. 2017, No. 2 (20).

5. Degtyarev, G.L., Meshchanov, A.S. Sliding Mode Control Methods. Monograph. Kazan. Publishing House of the Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI 2014. 104 p.
6. Efimov A.A. Modeling of control systems in a sliding mode with an active current converter. Moscow: Information and control systems No. 2. 2018.
7. Lubentsova E.V. Synthesis of an adaptive control system for a technological object with a delay under uncontrolled external disturbances. Devices and systems. Management, control, diagnostics. 2003. No. 9. P. 13-15.
8. Zhmud V.A. Adaptive automatic control systems with a single main loop. Moscow: Automation and software engineering. 2014, No. 2 (8).
9. Zhiqiang, Gao Techniques in Reconfigurable Control System Design. Editor(s): Cornelius T. Leondes, Control and Dynamic Systems, Academic Press, Volume 79,1996, Pages 89-115.
10. Zhmurko, D. Yu. Concept, essence and classification of adaptive control of systems with organizational complexity. Krasnodar. Scientific journal of KubSAU, No. 90 (06), 2013.
11. Demin, A. V. Vityaev, E. E. Logical model of the adaptive control system. Moscow: Neuroinformatics. 2008, Vol. 3, No. 1. P. 79-107.
12. Borup, K. T., Fossen, T. I., & Johansen, T. A. (2016). A Nonlinear Model-Based Wind Velocity Observer for Unmanned Aerial Vehicles. In IFAC-PapersOnLine.Vol. 49, pp. 276–283.
13. Lubentsov, V. F., Lubentsova, E. V., & Masyutina, G. V. Analysis and synthesis of robust control systems using the guaranteed dynamics method. Modern problems and their solutions in science, production and education. 2018. (6), 7-9.
14. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Robust correction in control systems with a large gain. Mechatronics, automation, control. 2014. No. 12. pp. 3-10.
15. Lubentsova E. V., Petrakov V. A., Slyusarev G. V., Lubentsov V. F. Method for constructing fuzzy controllers using analytical expressions for control actions. Fundamental research. 2015. No. 11-3. P. 484-490.
16. I. Tomac, J. Slavič. Damping identification based on a high-speed camera, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 166, 2022, 108485, ISSN 0888-3270
17. Ignatiev, V. V., Kureichik, V. M., Spiridonov, O. B., & Ignatyeva, A. S. (2017). Hybrid control method based on an adaptive neuro-fuzzy inference system. Bulletin of the Southern Federal University. Engineering sciences, (9 (194)), 124-132.
18. Lyutikova M. N. Improving the control of a multipurpose towed complex using a neural network controller in the asymptotics of Bernstein polynomials, Marine intelligent technologies. 2022. No. 3 part 1, pp. 153-159.
19. Dantsevich I. M., Lubentsov V. F. Determination of parameters of hydrodynamic coefficients in the working control functions of remotely controlled unmanned vehicles, Marine intelligent technologies. 2022. No. 4 part 1, pp. 242-250
20. Lubentsova E.V., Masyutina G.V., Rudakova T.A., Lubentsov V.F. Synthesis of an interval control system with an adaptive PID controller. Automation in industry. 2013. No. 9. pp. 62-64.

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

Данцевич Игорь Михайлович кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова», 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93, e-mail: dantsevich.aumsu@gmail.com

Dantsevich Igor M. Ph.D. (Eng), Candidate of Technical Science, Department of Radioelectronics and Information Technologies Admiral Ushakov maritime state university, 353924, Russia, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: dantsevich.aumsu@gmail.com

Лубенцов Валерий Федорович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизации производственных процессов, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», 350072, Россия, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2; e-mail: vf.lubentsov@yandex.ru

Valery F. Lubentsov, Dr. Sci. (Eng.), assistant professor, Professor of the Department of Automation of Production Processes, Kuban State Technological University, 350072, Russia, Krasnodar Territory, Krasnodar, st. Moskovskaya, 2; e-mail: vf.lubentsov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 13.05.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 04.07.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 12.07.2026.

Научная статья
УДК 681.518.5:004.052.32
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.051

Метод синтеза самодиагностируемых устройств для судовых информационно-измерительных и управляющих систем (Часть 2)

Ефанов Д.В.[1] TrES-4b@yandex.ru, **Елина Е.И.**[1] eseniya-elina@mail.ru
[1]Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. В настоящей части статьи демонстрируются практические результаты разработанного авторами метода синтеза частично и полностью самопроверяемых дискретных устройств судовых информационно-измерительных и управляющих систем, основанного на выделении собственного подмножества кодовых слов заданного взвешенного кода с суммированием. Показано, что не для любого собственного подмножества кодовых слов взвешенного кода с суммированием удается добиться полной самопроверяемости тестера, что как раз и показано в статье. Авторы привели пример построения тестера для модификации выбранного взвешенного кода с суммированием, для которого при исправной работе устройства и схемы его встроенного контроля не удается обеспечить полную проверку. Решение в таком случае состоит в периодическом тестовом диагностировании самого тестера в составе схемы встроенного контроля. Для этого до входов тестера устанавливаются мультиплексоры с одним управляющим входом, позволяющие переводить тестер в режим кратковременного тестирования в моменты, когда на входах устройства не меняются значения наборов аргументов. Для большого количества дискретных систем критического применения это допустимо, так как многие из них управляют процессами с редко меняющимися входными воздействиями. Решения авторов могут оказаться востребованными при разработке дискретных устройств с обнаружением неисправностей для судовых информационно-измерительных и управляющих систем, а также в других отраслях транспорта.
Ключевые слова: судовые информационно-измерительные и управляющие системы, дискретные устройства на морском транспорте, самодиагностируемые устройства, схема встроенного контроля, логическая коррекция сигналов, взвешенный код с суммированием, собственное подмножество кодовых слов, обеспечение проверки тестера
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: Ефанов Д.В., Елина Е.И. Метод синтеза самодиагностируемых устройств для судовых информационно-измерительных и управляющих систем (Часть 2), Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 231—237. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.051

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.051

A method for designing self-diagnostic devices for shipboard information-measuring and control systems (Part 2)

Dmitry V. Efanov[1] TrES-4b@yandex.ru, **Yeseniya I. Yelina**[1] eseniya-elina@mail.ru
[1]Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences

Abstract. In this part of the paper, the practical results of the method developed by the authors for the design of partially and fully self-checking discrete devices shipboard information-measuring and control systems are presented. The method is based on selecting a proper subset of codewords of a given weight-based sum code. It is shown that full self-checkability of the checker cannot be achieved for every proper subset of codewords of a weight-based sum code, which is precisely demonstrated in this paper. The authors present an example of constructing a checker for modified weight-based sum code, for which, even under correct operation of the device and its concurrent error-detection circuit, it is not possible to provide a complete checking. The solution in this case is to periodically perform test-based diagnostics of the checker itself as part of a concurrent error-detection circuit. To do this, multiplexers with a single control input are installed before the checker inputs, allowing the checker to be put into a short-term test mode at times when the values of the argument sets do not change at the device's inputs. For a large number of discrete systems with critical applications, this is acceptable, since many of them control processes with slowly changing input stimuli. The authors' solutions may be in demand in the development of discrete fault detection devices shipboard information-measuring and control systems, as well as for other transport domains.
Key words: shipboard information-measuring and control systems, discrete devices in maritime transport, self-diagnostic devices, concurrent error-detection circuit, Boolean signal correction, weight-based sum code, proprietary subset of codewords, checker testability

© Ефанов Д.В., Елина Е.И. 2026

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: Dmitry V. Efanov, Yeseniya I. Yelina, A method for designing self-diagnostic devices for shipboard information-measuring and control systems (Part 2), Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 231—237. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.051

Введение

Задача обнаружения неисправностей при эксплуатации дискретных устройств судовых информационно-измерительных и управляющих систем является первостепенной для последующей реакции на возникающие ошибки в вычислениях.

В настоящей части статьи разработанный авторами метод апробируется в экспериментах с тестовыми комбинационными схемами MCNC Benchmarks [1, 2]. Они используются во всем мире для проверки и подтверждения эффективности применения разрабатываемых методов синтеза дискретных устройств и их технической диагностики. Также в статье приведено схемотехническое решение, обеспечивающее полную проверку тестера в схеме встроенного контроля (СВК).

Экспериментальные результаты

В ходе исследований разработанного авторами метода синтеза самопроверяемых дискретных устройств судовых информационно-измерительных и управляющих систем были поставлены эксперименты с тестовыми комбинационными схемами из набора MCNC Benchmarks [1, 2]. Целью эксперимента являлось сравнение метода синтеза дискретного устройства с обнаружением неисправностей с традиционным методом, основанным на дублировании, по показателю сложности технической реализации. Гипотетически ввиду того, что корректируются сигналы со всех выходов объекта диагностирования, метод может оказаться сравнимым с дублированием. Однако результаты экспериментов демонстрируют на ряде тестовых схем существенное преимущество разработанного авторами метода!

Были выбраны тестовые схемы с числом выходов $n \geq 6$. Для них в соответствии с разработанным алгоритмом синтезировалась СВК. При этом выходы разбивались на q «шестерок»:

$$\begin{cases} q = \left\lfloor \frac{n}{6} \right\rfloor, \ n(mod\ 6) = 0, \\ q = \left\lfloor \frac{n}{6} \right\rfloor + 1, \ n(mod\ 6) \neq 0. \end{cases} \quad (1)$$

Для каждого выделенного подмножества выходов синтезировалась СВК по разработанному авторами методу. Далее выходы отдельных СВК объединялись на входах самопроверяемого компаратора *qTRC*1, реализованного на основе q–1 элементарного модуля сжатия парафазных сигналов *TRC* (two-rail checker) [3]. Выходы разбивались на подмножества без перемешивания, в той последовательности, в которой они указаны в описании тестовой схемы. Причем, при n(mod6)≠0 последнее подмножество образовывали n(mod6) последних выходов, а также уже использованные в q–1 подмножестве 6–n(mod6) выходов. Такой способ организации контроля описан в [4] и может применяться как альтернатива дублированию «свободных» n(mod6)≠0 выходов.

Для каждой тестовой схемы определялись параметры СВК, а также формировались блоки вычисления функций коррекции для каждой «шестерки» выходов, которые затем синтезировались совместно. Для обработки файлов использовались интерпретатор SIS и библиотека функциональных элементов stdcell2_2.genlib [5, 6]. С помощью данного средства определялся параметр площади, занимаемой устройством на кристалле (в условных единицах библиотеки функциональных элементов). Для элементарных структурных единиц этот параметр задан в библиотеке, также на основании структур устройств *TRC* и тестера были определены показатели сложности их реализации: L_{TRC} = 192 (усл. ед.), а L_{TSC} = 336 (усл. ед.). Результаты экспериментов для некоторых тестовых схем приведены в табл. 1 и на рис. 1.

В столбцах $L_{F(X)}$ и $L_{G(X)}$ приведены значения показателей сложности реализации исходного устройства $F(X)$ и блока вычисления функций коррекции $G(X)$. Последний показатель в значительной мере влияет на итоговые показатели сложности технической реализации получаемых частично проверяемых устройств. Поэтому в табл. 1 приведены для каждой схемы приведены данные следующего показателя:

$$\zeta = \frac{L_{G(X)}}{L_{F(X)}} \cdot 100\ \%. \quad (2)$$

В столбце L_{CED} приведены рассчитанные данные по показателю площади реализации дискретного устройства с обнаружением неисправностей, полученного по разработанному методу, а в столбце L_D – по методу дублирования. Данные рассчитаны по аналогии с тем, как это сделано в [7]. В последнем столбце табл. 1 приведены значения следующего показателя:

$$\delta = \frac{L_{CED}}{L_D} \cdot 100\ \%. \quad (3)$$

Коэффициент δ является ключевым показателем, демонстрирующим эффективность (или ее отсутствие) по сравнению с использованием дублирования для синтеза устройства с обнаружением неисправностей. Для наглядности он также иллюстрируется для каждой схемы на рис. 1. Более чем для половины тестовых схем значение δ < 100 %, что говорит об эффективности применения разработанного метода для синтеза дискретного устройства с обнаружением неисправностей; для девяти схем получено значение δ > 100 %, что говорит о низкой эффективности в сравнении с дублированием применения разработанного метода.

Следует отметить, что в значительной степени на итоговый показатель сложности реализации устройства оказывает влияние значение показателя $L_{G(X)}$. У блока $G(X)$ в предложенном варианте организации СВК столько же выходов, сколько у

контролируемой подсхемы блока $F(X)$, а сами реализуемые на них функции могут иметь различную сложность [8], что как раз и влияет на показатели избыточности.

Таблица 1

Результаты экспериментов с тестовыми комбинационными схемами

Тестовая схема	n	q	$L_{F(X)}$	$L_{G(X)}$	ζ, %	L_{CED}	L_D	δ, %
max512	6	1	9632	7376	76,6	17584	20320	86,5
dc1	7	2	976	952	97,5	3272	3216	101,7
dekoder	7	2	736	1024	139,1	3104	2736	113,5
wim	7	2	712	1008	141,6	3064	2688	114
newapla2	7	2	600	1080	180	3024	2464	122,7
dc2	7	2	2424	4648	191,7	8416	6112	137,7
newbyte	8	2	592	880	148,6	2816	2656	106
mlp4	8	2	7224	9648	133,6	18216	15920	114,4
f51m	8	2	2272	4400	193,7	8016	6016	133,2
inc	9	2	2376	2208	92,9	5928	6432	92,2
dk27	9	2	528	1336	253	3208	2736	117,3
newcpla2	10	2	1896	2136	112,7	5376	5680	94,6
sqr6	12	2	2648	3128	118,1	7120	7600	93,7
m1	12	2	3064	1424	46,5	5832	8432	69,2
p82	14	3	2368	2664	112,5	7144	7456	95,8
m2	16	3	10096	4344	43	16552	23328	71
m3	16	3	13464	4648	34,5	20224	30064	67,3
m4	16	3	18704	6024	32,2	26840	40544	66,2
tms	16	3	6784	3992	58,8	12888	16704	77,2
newcpla1	16	3	2520	3480	138,1	8112	8176	99,2
newxcpla1	23	4	3760	3984	106	10624	12112	87,7
max128	24	4	20192	6696	33,2	29768	45184	65,9

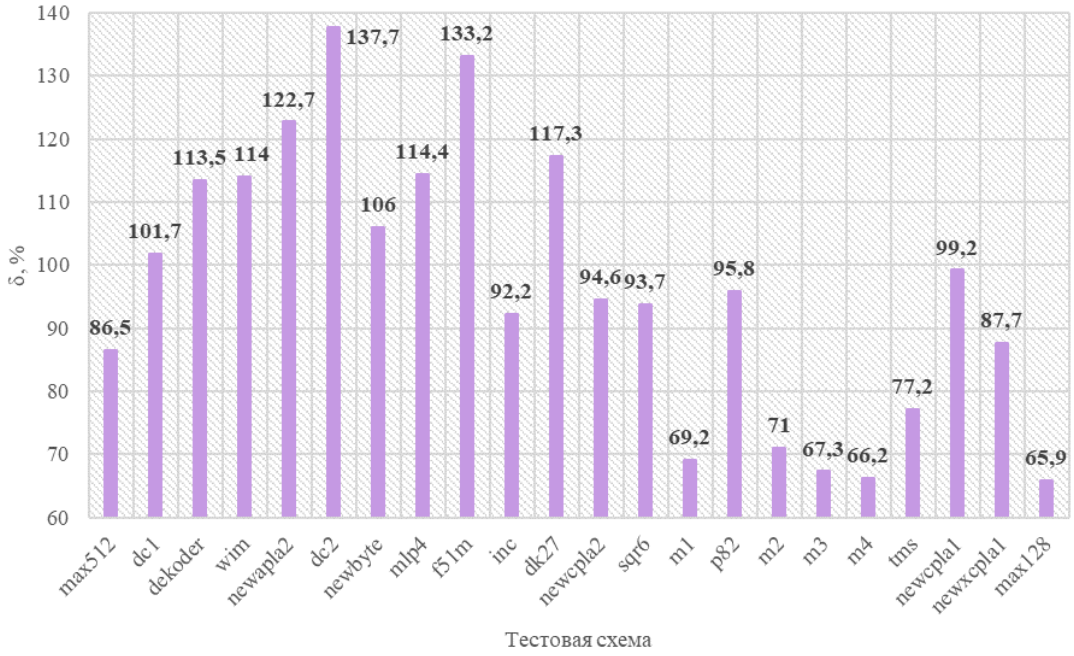


Рис. 1. Значения показателя δ для тестовых схем

Для двенадцати схем был получен показатель $\zeta > 100$ %, при этом среди данных схем оказались восемь из девяти тех схем, для которых и $\delta > 100$ %. При этом для одной схемы показатель ζ весьма близок к 100 %. Это свидетельствует о том, что в целях дальнейшего уменьшения значения показателя δ следует разработать методы синтеза СВК с уменьшенным числом выходов блока $G(X)$. Для рассматриваемого подхода к синтезу дискретных устройств судовых информационно-измерительных и управляющих систем это возможно.

Особенности организации проверки тестера в схеме встроенного контроля

Особенностью тестера $WS^*(4, 2, 4)$ кода, изображенного на рис. 2 в первой части настоящей статьи [9], с рассматриваемыми кодовыми словами является то, что он не будет являться самопроверяемым. Иными словами, при подаче на его входы кодовых слов из множества {000000, 110101, 101110, 011011} не будет обеспечена проверка его структуры. Для полной проверки необходима подача на входы иных кодовых слов, входящих в проверяющий тест $T_п$. Поэтому напрямую только использование полученного тестера $WS^*(4, 2, 4)$ кода с рассматриваемыми кодовыми словами не даст возможности организации полностью самопроверяемой СВК. Это является существенным недостатком применения $WS^*(4, 2, 4)$ кода при синтезе устройства с обнаружением неисправностей. Но имеется схемотехническое решение, позволяющее переводить работу тестера в кратковременные специально отведенные промежутки времени для подачи кодовых слов из $T_п$.

На рис. 2 приведено схемотехническое решение, позволяющие осуществлять работу тестера $WS^*(4, 2, 4)$ кода с рассматриваемыми кодовыми словами в режиме тестово-функционального диагностирования. Особенностью является установка до входов тестера мультиплексоров с одним управляющим входом. На этот вход подается сигнал перевода тестера в режим тестового диагностирования: если на управляющий вход подан логический 0, то тестер работает в режиме контроля принадлежности поступающих кодовых слов $WS^*(4, 2, 4)$ коду; если на управляющий вход подана логическая 1, то тестер переводится в режим проверки его структуры для подачи кодовых слов из $T_п$. Кодовые слова, входящие в $T_п$, подаются с помощью генератора проверяющего теста $G(T_п)$ и определяются заранее.

Нанесем на схему тестера все неисправности вида «константа 0» и «константа 1» на входы и выходы логических элементов, входящих в его структуру (рис. 3). На каждой линии схемы, тем самым, окажется по две неисправности: кружок сверху соответствует «константе 1», а кружок снизу – «константе 0». Далее в соответствии с логикой работы элементов, входящих в структуру, нанесем на схему тестера графы эквивалентных и импликантных неисправностей (сплошной линией показаны эквивалентные неисправности, а пунктирной со стрелкой – импликантные). Это за счет логических зависимостей по трансляции ошибок на выходы элементов позволит сократить множество неисправностей N_i для формирования $T_п$. Принципы установления эквивалентных и импликантных неисправностей приведены в [10], а методика сокращения множеств неисправностей описана в [11]. Точки, в которых требуется проверка тестера, пронумерованы: имеется 24 контрольные точки.

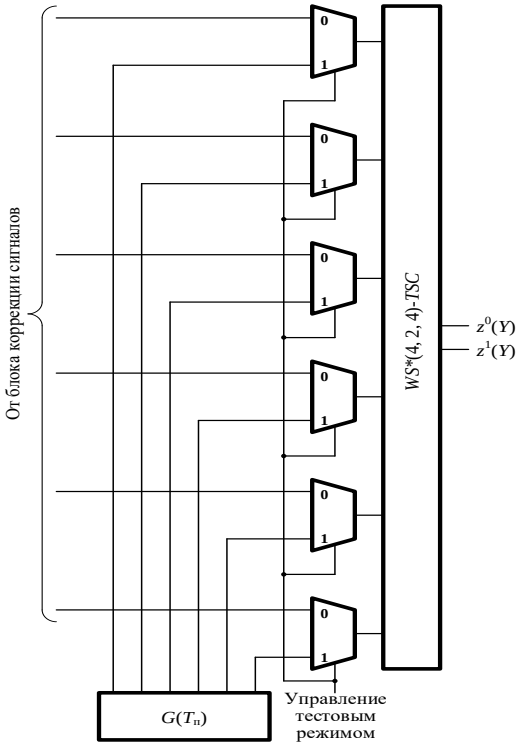


Рис. 2. Схемотехническая реализация для проверки тестера WS(4, 2, 4) кода*

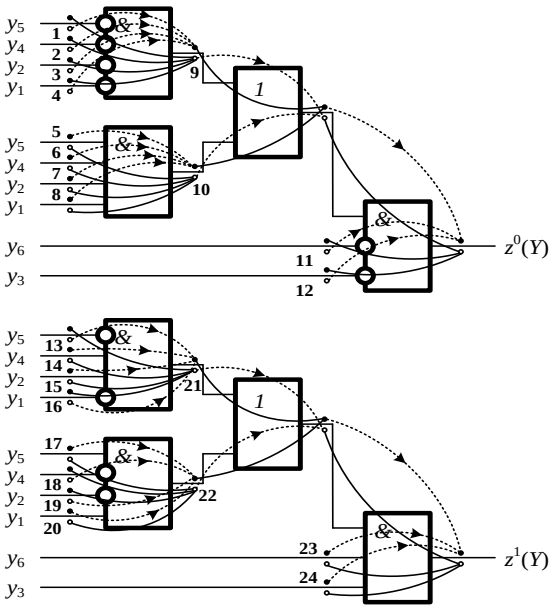


Рис. 3. Множество неисправностей тестера WS(4, 2, 4) кода*

В табл. 2 для каждой из неисправностей N_i приведены множества кодовых слов $T(N_i)$, позволяющие осуществить полную проверку тестера. Проверяющий тест включает в себя по одному кодовому слову, позволяющему проверить каждую из неисправностей. Минимальная его длина

равна 20. Именно кодовые слова из $T_п$ и нужно сформировать с помощью $G(T_п)$ при работе устройства в режиме проверки тестера. Проверяющий тест для тестера следует подавать в моменты времени, когда сигналы на входах дискретного устройства судовых информационно-измерительных и управляющих систем не меняются и есть возможность кратковременного отключения СВК от работы для прогона тестовых воздействий.

Таблица 2

Тестовые комбинации для неисправностей

N_i	$T(N_i)$
1	010000, 010100, 110000
2	001000, 001100, 101000
3	000010, 000110, 100010
4	000001, 000101, 100001
5	001011, 001111, 100011
6	010011, 010111, 110011
7	011001, 011101, 111001
8	011001, 011101, 111010
9	000000, 000100, 100000
10	011011, 011111, 111011
11	100000, 111011
12	000100, 011111
13	111101
14	100101
15	101100
16	101111
17	100110
18	111110
19	110111
20	110100
21	101101
22	110110
23	101001, 110010
24	001101, 010110

Это не является критическим, поскольку подача такого малого количества тестовых воздействий на входы тестера в современной микроэлектронной технике занимает тысячные и десятитысячные доли секунды, а воздействия на дискретные устройства длятся и не меняются гораздо большее время.

Заключение

Разработанный авторами и описанный в первой части настоящей статьи [9] метод синтеза самопроверяемых дискретных устройств судовых информационно-измерительных и управляющих систем обладает рядом особенностей, связанных с использованием собственного подмножества кодовых слов взвешенного кода с суммированием.

В эксперименте с тестовыми комбинационными схемами показано, что в большинстве случаев даже предложенный авторами метод организации СВК позволяет получить менее избыточную структуру, чем при использовании метода дублирования. При этом, напомним читателю, что корректируются сигналы со всех выходов дискретного устройства судовых информационно-измерительных и управляющих систем. Для тринадцати из двадцати двух приведенных схем удалось получить менее избыточные структуры, чем при использовании дублирования. При этом некоторые дальнейшие исследования говорят о возможности уменьшения числа корректируемых сигналов от объекта диагностирования при использовании собственного подмножества кодовых слов взвешенного кода с суммированием.

Достоинства метода кажутся очевидными – создается возможность учета особенностей структуры объекта диагностирования при построении СВК. А вот недостаток – это необходимость работы тестера как в режиме рабочего (функционального) диагностирования, так и в режиме тестового диагностирования. Однако для современной быстродействующей микроэлектронной техники это не является проблемой. Можно говорить о том, что это специфика самого метода синтеза самопроверяемого дискретного устройства судовых информационно-измерительных и управляющих систем.

Исследования в области синтеза полностью и частично самопроверяемых дискретных устройств позволяют получить новые методы, в том числе, более полно учитывающие свойства исходных объектов диагностирования. Результаты, полученные авторами, могут оказаться интересными при разработке дискретных устройств с обнаружением неисправностей в тех приложениях, для которых входные данные меняются не столь часто. К ним относится большое количество систем критического применения, например, судовые информационно-измерительные и управляющие системы, управляющие комплексы на железнодорожном транспорте, в атомной промышленности, в авиации и в космических технологиях, в средствах противовоздушной обороны и т. д. [12 – 15].

Литература

1. McElvain K. IWLS'93 Benchmark Set: Version 4.0. – Distributed as a part of IWLS'93 benchmark set, May 1993.
2. Collection of Digital Design Benchmarks. – URL: https://ddd.fit.cvut.cz/www/prj/Benchmarks/ (дата обращения 22.07.2025).
3. Carter W.C., Duke K.A., Schneider P.R. Self-Checking Error Checker for Two-Rail Coded Data // United States Patent Office, filed July 25, 1968, ser. No. 747533, patented Jan. 26, 1971, N. Y. –10 p.
4. Ефанов Д.В., Елина Е.И. Синтез самопроверяемых цифровых устройств на основе логической коррекции сигналов с применением взвешенных кодов Боуза – Лина // Проблемы управления. – 2024. – №4. – С. 26-43. – DOI: 10.25728/pu.2024.4.3.
5. Sentovich E.M., Singh K.J., Lavagno L., Moon C., Murgai R., Saldanha A., Savoj H., Stephan P.R., Brayton R.K., Sangiovanni-Vincentelli A. SIS: A System for Sequential Circuit Synthesis. Electronics Research Laboratory, Department of Electrical Engineering and Computer Science. – Berkeley: University of California, 1992. – 45 p.
6. Sentovich E.M., Singh K.J., Moon C., Savoj H., Brayton R.K., Sangiovanni-Vincentelli A. Sequential Circuit Design Using Synthesis and Optimization // Proceedings IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in

Computers & Processors, 11-14 October 1992, Cambridge, MA, USA. – pp. 328-333, doi: 10.1109/ICCD.1992.276282.
7. Ефанов Д.В., Елина Е.И. Исследование алгоритмов синтеза самопроверяемых цифровых устройств на основе логической коррекции сигналов с применением взвешенных кодов Боуза – Лина // Автоматика на транспорте. – 2024. – Том 10, №1. – С. 74-99. – DOI: 10.20296/2412-9186-2024-10-01-74-99.
8. Коршунов А.Д. Сложность вычислений булевых функций // Успехи математических наук. – 2012. – Т. 67, №1 (403). – С. 97-168. – DOI: 10.4213/rm9459.
9. Ефанов Д.В., Елина Е.И. Метод синтеза самодиагностируемых устройств для судовых информационно-измерительных и управляющих систем (Часть 1) // Морские интеллектуальные технологии. – 2026. – Т.2, №1(72). – С. 250-257.
10. Василенко М.Н., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. О сокращении списка одиночных неисправностей при построении тестов комбинационных схем // Автоматика и телемеханика. – 1974. – №8. – С. 139-145.
11. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В. Основы теории надежности и технической диагностики. – Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 2019. – 588 с.
12. Drozd O., Antoniuk V., Nikul V., Drozd M. Hidden Faults in FPGA-Built Digital Components of Safety-Related Systems // Proceedings of the 14th International Conference TCSET'2018, Lviv-Slavsko, Ukraine, 2018. – pp. 805-809. doi: 10.1109/TCSET.2018.8336320.
13. Сапожников Вл.В. Синтез систем управления движением поездов на железнодорожных станциях с исключением опасных отказов. – М.: Наука, 2021. – 229 с.
14. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Применение интеллектуальных систем поддержки судоводителя для оптимизации процесса аварийного торможения морского судна, основанного на принципах циркуляции // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – № 3-1 (65). – С. 287-293. – DOI: 10.37220/MIT.2024.653.052.
15. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Вислогузов В.В. Алгоритм безопасного аварийного торможения судна с помощью руля // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – № 4-1 (66). – С. 325-330. – DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.039.

References

1. McElvain K. IWLS'93 Benchmark Set: Version 4.0. – Distributed as a part of IWLS'93 benchmark set, May 1993.
2. Collection of Digital Design Benchmarks. – URL: https://ddd.fit.cvut.cz/www/prj/Benchmarks/ (date of request 22.07.2025).
3. Carter W.C., Duke K.A., Schneider P.R. Self-Checking Error Checker for Two-Rail Coded Data. United States Patent Office, filed July 25, 1968, ser. No. 747533, patented Jan. 26, 1971, N. Y. – 10 p.
4. Efanov D.V., Yelina Y.I. Design of self-checking digital devices based on Boolean signals correction using weight-based Bose–Lin codes // Control Sciences. – 2024. – № 4. – pp. 22-36. DOI: 10.25728/cs.2024.4.3.
5. Sentovich E.M., Singh K.J., Lavagno L., Moon C., Murgai R., Saldanha A., Savoj H., Stephan P.R., Brayton R.K., Sangiovanni-Vincentelli A. SIS: A System for Sequential Circuit Synthesis. Electronics Research Laboratory, Department of Electrical Engineering and Computer Science. – Berkeley: University of California, 1992. – 45 p.
6. Sentovich E.M., Singh K.J., Moon C., Savoj H., Brayton R.K., Sangiovanni-Vincentelli A. Sequential Circuit Design Using Synthesis and Optimization. Proceedings IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers & Processors, 11-14 October 1992, Cambridge, MA, USA. – pp. 328-333, doi 10.1109/ICCD.1992.276282.
7. Efanov D.V., Yelina Y.I. Issledovanie algoritmov sinteza samoproveryaemykh cifrovykh ustrojstv na osnove logicheskoj korrekcii signalov s primeneniem vzveshennykh kodov Bouza–Lina [Study of algorithms for synthesis of self-checking digital devices based on Boolean correction of signals using weighted Bose–Lin codes] // Avtomatika na transporte. – 2024. – Vol. 10, № 1. – pp. 74–99. DOI: 10.20296/2412-9186-2024-10-01-74-99.
8. Korshunov A.D. Computational complexity of Boolean functions // Russian Mathematical Surveys. – 2012. – Vol. 67, № 1. – pp. 93-165. DOI: 10.1070/RM2012v067n01ABEH004777.
9. Efanov D.V., Ylina Y.I. Metod sinteza samodiagnostiruemykh ustroistv dlya sudovykh informatsionno-izmeritel'nykh i upravlyayushchikh sistem (Chast' 1) [A method for designing self-diagnostic devices for shipboard information-measuring and control systems (Part 1)] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2026. – Vol2, № 1(72). – pp. 250-257.
10. Vasilenko M.N., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V. O sokrashchenii spiska odinochnykh neispravnostej pri postroenii testov kombinacionnykh skhem [On reduction of a list of single faults in construction of tests for combinational circuits] // Avtomatika i telemekhanika. – 1974. – № 8. – pp. 139-145.
11. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V., Efanov D.V. Osnovy teorii nadezhnosti i tekhnicheskoj diagnostiki [Fundamentals of reliability theory and technical diagnostics]. – SPb.: izd. «Lan'», 2019. – 588 s.
12. Drozd O., Antoniuk V., Nikul V., Drozd M. Hidden Faults in FPGA-Built Digital Components of Safety-Related Systems. Proceedings of the 14th International Conference TCSET'2018, Lviv-Slavsko, Ukraine, 2018. – pp. 805-809. doi: 10.1109/TCSET.2018.8336320.
13. Sapozhnikov Vl.V. Sintez sistem upravleniya dvizheniem poezdov na zheleznodorozhnyh stanciyah s isklyucheniem opasnyh otkazov. [Synthesis of train control systems at railway stations with the elimination of dangerous failures]. – Moscow: Nauka, 2021. – 229 p.
14. Kaminskij V.Y., Skorohodov D.A. Primenenie intellektual'nyh sistem podderzhki sudovoditelya dlya optimizacii processa avarijnogo tormozheniya morskogo sudna, osnovannogo na principah cirkulyacii [The use of intelligent boatmaster support systems to optimize the process of emergency braking of a marine vessel based on the principles of circulation] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2024. – № 3-1(65). – pp. 287-293. DOI: 10.37220/MIT.2024.653.052.

15. Kaminskij V.Y., Skorohodov D.A., Visloguzov V.V. Algoritm bezopasnogo avarijnogo tormozheniya sudna s pomoshch'yu rulya [Algorithms of safe emergency braking of the vessel using the rudder] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2024. – № 4-1(66). – pp. 325-330. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.039.

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

Ефанов Дмитрий Викторович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем организации транспортных систем, Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, 12-я линия ВО, 13, e-mail: TrES-4b@yandex.ru

Dmitry V. Efanov, Dr. Sci. (Eng.), professor, leading researcher at the laboratory of transport systems organization problems, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: TrES-4b@yandex.ru

Елина Есения Игоревна, аспирант, научный сотрудник лаборатории проблем организации транспортных систем, Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, 12-я линия ВО, 13, e-mail: eseniya-elina@mail.ru

Yeseniya I. Yelina, graduate student, researcher at the laboratory of transport systems organization problems, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: eseniya-elina@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.07.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.07.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 22.07.2026.

Обзорная статья
УДК 007.52
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.052

Обзор современного состояния морских беспилотных поисковых систем

Май С.З.[1] maixuandung85@gmail.com**, Ходашинский И.А.**[1] hodashn@rambler.ru,
Шурыгин Ю.А.[1] yuriy.shurygin@tusur.ru
[1]Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Аннотация. Данный обзор обобщает и оценивает текущие научные исследования и инженерные приложения в области морских беспилотных поисковых систем трех типов: беспилотные летательные аппараты (БПА), беспилотные надводные суда (БНС) и гетерогенные системы (совместное применение). Рассматриваются типы и модели морского поиска, методы обнаружение морских объектов, методы планирования траектории, как на основе традиционных алгоритмов оптимизации, так и с использованием метаэвристических подходов. В обзоре выявляются и анализируются ключевые тенденции, проблемы и достижения в области управления и планирования траектории движения беспилотных поисковых систем. На основе обобщения и критического анализа литературы данный обзор не только представляет всестороннее понимание современного состояния исследований в области морских беспилотных поисковых систем, но и определяет направления для будущих исследований в этой быстро развивающейся области.
Ключевые слова: морской поиск, беспилотные летательные аппараты, беспилотные надводные суда, гетерогенные системы, планирования траектории, управление, оптимизация
Финансирование: работа выполнена в рамках программы «Приоритет-2030» (Пр2030-МОН наука/СЦ3/Б/12).
Для цитирования: Май С.З., Ходашинский И.А., Шурыгин Ю.А. Обзор современного состояния морских беспилотных поисковых систем, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 238—248. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.052

Review
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.052

A review of the current state of marine unmanned search systems

Xuan Dung Mai[1] maixuandung85@gmail.com**, Ilya A. Hodashinsky**[1] hodashn@rambler.ru,
Yuri A. Shurygin[1] yuriy.shurygin@tusur.ru
[1]Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Russian Federation,

Abstract. This review summarizes and evaluates current research and engineering applications in the field of unmanned maritime search systems (URS) of three types: unmanned aerial vehicles (UAVs), unmanned surface vessels (USVs), and heterogeneous systems (combined applications). It examines maritime search types and models, maritime object detection methods, and trajectory planning methods, both based on traditional optimization algorithms and using metaheuristic approaches. The review identifies and analyzes key trends, challenges, and advances in the control and trajectory planning of URS. By synthesizing and critically analyzing the literature, this review not only provides a comprehensive understanding of the current state of research in the field of unmanned maritime search systems but also identifies directions for future research in this rapidly evolving field.
Keywords: maritime search, unmanned aerial vehicles, unmanned surface vessels, heterogeneous systems, trajectory planning, control, optimization
Financial Support: the work was carried out within the framework of the Priority 2030 program (Pr2030-MON science/SC3/B/12).
For citation: Xuan Dung Mai, Ilya A. Hodashinsky, Yuri A. Shurygin, Review of the current state of marine unmanned search systems, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 238—248. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.052

Введение

Рост морских транспортных перевозок и освоение морских ресурсов приводят к увеличению числа аварий на море. После таких инцидентов морские поисково-спасательные операции играют решающую роль в спасении людей и минимизации последствия этих инцидентов. Проектирование системы поиска и спасания на море включает предварительное размещение спасательных средств, развертывание мобильных подразделений и распределение аварийных средств. Традиционные модели систем поиска и спасения в основном ориентированы на стационарные береговые спасательные станции и направлены на оптимизацию развертывания спасательных ресурсов. Однако ориентация только на стационарные береговые базы часто приводит к высоким затратам и ограниченной эффективности. Альтернативным решением является создание спасательных станций на море, которые, размещаются в районах с высокой вероятностью инцидентов для обеспечения круглосуточной готовности к ним. В [1] представлена динамическая модель распределения, которая учитывает наличие спасательных мощностей, сезонные изменения инцидентов и состояния океана. Модель направлена на достижение двух ключевых целей: максимизация ожидаемой доступности к инцидентам и минимизация общих затрат системы [1].

© Май С.З., Ходашинский И.А., Шурыгин Ю.А. 2026

Кроме стратегического планирования поиска и спасания актуальной является задача планирования поисковых систем реагирования на уже случившийся инцидент. Традиционные морские поисковые системы, такие как независимые надводные корабли или воздушные суда, не отвечают в полной мере требованиям проведения поисково-спасательных операций. Беспилотные системы (БПС) с автономными возможностями приобретают все большее значение в морском поиске благодаря своим преимуществам, таким как высокая эффективность, экономичность и быстрое развертывание [2], последнее является важнейшим фактором успеха поисково-спасательных операций из-за сокращения времени выживания пострадавших, оказавшихся за бортом.

Беспилотные системы с автономными возможностями представляют собой интеллектуальные киберфизические системы, в которых реализованы дистанционное зондирование, коммуникации, вычисления в реальном времени и автономное управление полетом, которое обеспечивает внешне независимую навигацию и выполнение поисковых задач [3].

Учитывая потенциал беспилотных систем, в данном обзоре представлено современное состояние планирования и выполнения морских спасательных операций с использованием автономных беспилотных систем трех типов: беспилотные летательные аппараты (БЛА), беспилотные надводные суда (БНС) и гетерогенные системы (совместное применение БЛА и БНС).

Цель работы – обобщить текущие научные исследования и инженерные приложения в области морских беспилотных поисковых систем.

Статья является расширенной версией доклада, сделанного на конференции [4].

Типы и модели морского поиска

Морские поисково-спасательные операции можно разделить на две составляющих: морской поиск и морское спасение; причём морской поиск играет более важную роль [2]. В руководстве Международной авиационной и морской поисково-спасательной службы (IAMSAR) в качестве ориентира для морского спасательного центра приводятся четыре основных типа поиска (рис. 1) [5]:

секторный поиск, при котором поиск выполняется в пределах определенного радиуса сектора;

параллельный поиск или *поиск по принципу газонокосилки*, при котором выполняется возвратно-параллельное движение, при этом ширина пути должна быть меньше двух радиусом сканирования системы поиска;

поиск по схеме расширяющегося квадрата, здесь движение начинается от базовой точки, постепенно расширяясь наружу;

координируемый поиск «воздух-море», когда БНС может следовать по своей заданной траектории движения, а БЛА ведет поиск в поперечном полете, что позволяет БЛА в полной мере использовать свое преимущество в скорости [2, 5].

Следует отметить, что эти типы предлагаются не только для судов или летательных аппаратов с экипажем, но и применимы для морских беспилотных поисковых систем [5].

Стратегия применения БПС для выполнения поисковой миссии включает распределение заданий, создание модели области поиска и планирование траекторий.

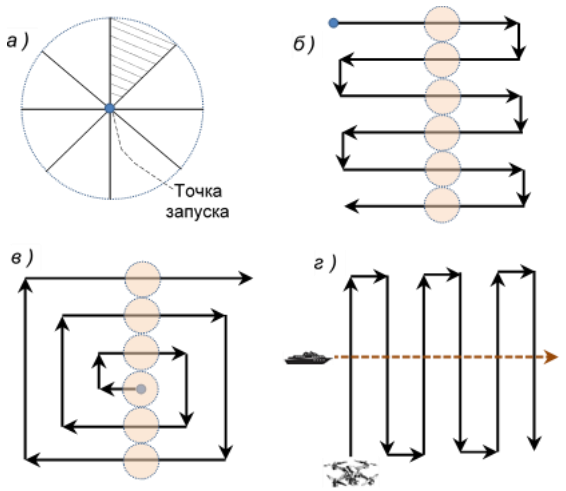


Рис. 1. Типы поиска
а) секторный б) параллельный в) по схеме расширяющегося квадрата г) координируемый поиск «воздух-море»

Моделирование области поиска предполагает дискретное представление непрерывного пространства области поиска. Для выполнения указанной задачи наиболее часто используются метод сетки, диаграммы Вороного, метод графа видимости [6].

Метод сетки является наиболее распространённым подходом благодаря своей простоте. В традиционных исследованиях по планированию траектории на основе сетки область поиска раскладывается на ячейки полигональной сетки. Как правило, ячейки имеют форму квадрата [7] или шестиугольника [8]. Площадь ячеек должна быть меньше или равна площади изображения, полученного с сенсора камеры, так как при движении БЛА должен полностью покрывать площадь поиска [9]. Длина пути рассчитывается как количество пройденных рёбер между ячейками. В [10] предложен алгоритм планирования маршрута на основе двойных глубоких Q-сетей, в котором на основе морской электронной карты и карты высот создаётся модель области поиска.

Существующие подходы к планированию пути, как правило, сосредоточены на поиске одного оптимального пути. Однако в поисково-спасательных работах важна полнота, а не только оптимальность. В [11] предложен метод *формирования (вывода)* пути, основанный на *диаграмме Вороного*, для вывода всех возможных путей без столкновений, удовлетворяющих ограничению расстояния.

Граф видимости используется для планирования пути в среде с многоугольными препятствиями. Если отрезок прямой, соединяющий две точки в пространстве поиска не проходит через препятствие, то этот отрезок включается в граф в качестве ребра. В [12] для сокращения времени генерации графа видимости использовалось квадродерево. Авторы [13] для планирования пути применили метаэвристический алгоритм роящихся частиц,

популяция решений которого формировалась на основе графа видимости.

Модель область поиска может быть задана в виде виртуального потенциального поля, в котором финальная точка выступает в роли источника притяжения, а существующие препятствия представляются источниками отталкивания. Указанная модель характеризуется простой структурой и ясной физической интерпретацией, она широко применяется для предотвращения столкновений в реальном времени благодаря своей способности легко учитывать динамическую среду. Однако она подвержена попаданию в локальные минимумы потенциального поля, что приводит к сбоям в достижении цели. Для устранения этих ограничений алгоритмы виртуального потенциального поля обычно применяются в сочетании с другими методами [14].

Планирование траекторий

В случае морской аварии эффективное обследование максимальной площади за минимальное время имеет решающее значение для спасения выживших. Обширные океанские акватории, затруднённая связь, нестабильное состояние моря (волны, течения) и меняющиеся погодные условия, оказывают существенное влияние на планирование и выполнение поисковой миссии.

Методы оптимизации траектории в [6] разделены на методы, основанные на теории графов, и метаэвристические алгоритмы оптимизации. Типичными представителями методов первого типа являются алгоритм Дейкстры [15], алгоритм A* и их модификации [16, 17]. Для оптимизации траектории используются традиционные метаэвристики [18], такие как генетический алгоритм [19], алгоритм роящихся частиц [13, 20] и алгоритм муравьиной колонии [17, 21], а также более современные метаэвристики, например, алгоритм коати [22], алгоритм анаконды [23], алгоритм осьминога [24].

Пространство, которое должно быть исследовано БПС, может быть непрерывным, а может состоять из отдельных областей. Исходя из этого, решается задача планирования траекторий либо для полного покрытия, либо для покрытий отдельно расположенных зон интереса. Вне зависимости от типа покрытия разработка эффективной стратегии поиска предполагает минимизацию таких взаимосвязанных характеристик как длина траектории, время полета, энергопотребление.

Планирование траектории покрытия для нескольких БПС, которое определяет области, которые должны быть исследованы, использует узлы и дуги на плоской двумерной среде, что приводит к типичной проблеме маршрутизации транспортных средств, относящимся к NP-трудным [21, 23]. Планирования пути в трехмерном пространстве с контролем высоты, с учётом особенности рельефа и препятствий требуют специализированных методов [25, 26].

В [9] предложен двухэтапный метод решения задачи планирования траектории покрытия зон с несколькими БЛА с учетом предотвращения столкновений между ними в полигональной зоне. На первом этапе использован метод сетки, на втором этапе использована модель смешанного целочисленного линейного программирования для получения оптимального пути покрытия.

Во многих исследованиях задача планирования маршрута БЛА рассматривалась как динамическая задача покрытия. Авторы [27] рассмотрели несколько сценариев с динамическими целями поиска и предложили метод планирования маршрута БЛА, основанный на вероятностной модели поиска цели с использованием клеточных автоматов, сверточных вычислений и теории Демпстера-Шейфера. В предложенный метод включены два алгоритма совместного управления парком БЛА, которые позволяют эффективно решать задачу планирования маршрутов в условиях движения цели поиска. Алгоритм использует обновляемые в реальном времени данные для определения приоритета ячеек сетки поиска, что позволяет планировать маршрут путем непрерывного назначения задач свободным БЛА.

В сложных и неизвестных 3D-средах со статичными и постоянно меняющимися динамическими препятствиями использование ограниченной информации об окружающей среде создаёт трудности при планировании траектории в реальном времени для БЛА. В [28] предложен подход к планированию траекторий в реальном времени, основанный на интерференционной гидродинамической системе, встроенной в нечеткую искусственную нейронную сеть. Алгоритм на основе интерференционной гидродинамической системы имеет сходство с методами потенциального поля, но использует более сложную стратегию обхода препятствий. алгоритм выполняет задачу планирования пути, непрерывно определяя следующую точку маршрута БЛА.

Средства отслеживания траектории полета

Автономное управление движением БПС является серьезной научной проблемой, решаемой путем создания контроллеров, способных справляться с неисправностями, адаптироваться к непредсказуемой среде и оптимизировать траектории полета. Для достижения надежного управления широко применяются традиционные контроллеры, такие как ПИД-регуляторы благодаря их простой структуре и легкости реализации.

Решение проблемы синтеза системы автоматического ведения судна по маршруту в [29] предложен ПД-регулятор. Выбор обусловлен тем, что такой регулятор, по утверждению авторов, способен подавлять резкие рывки и устойчив при высокочастотных возмущениях (волнениях). При идентификации динамики судна учтено насыщение при регулировании. В работе выполнена линеаризация нелинейной модели в окрестности устойчивой точки, получена система уравнений пространства состояний, определены граничные условия эффективной работы регулятора, выполнена проверка на устойчивость.

В обзорной статье [30] рассмотрено применение различных схем ПИД-регулирования в квадрокоптерах управление, которыми осуществляется путем изменения скорости вращения каждого из четырех двигателей. Углы крена, тангажа, рыскания и суммарная тяга могут быть использованы в качестве управляющих переменных для автономного управления. Динамика

квадрокоптера описывается нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка. ПИД-регулирование является естественной формой управления системой второго порядка, поскольку оно уменьшает ошибку в установившемся режиме и компенсирует некоторые возмущения. В [30] рассмотрены линейные, нелинейные, адаптивные, событийные, стратегии управления с изменением коэффициентов усиления, отказоустойчивые, дробные и интеллектуальные ПИД-регуляторы; представлены преимущества и недостатки указанных регуляторов, а также некоторые способы устранения этих недостатков; проанализированы открытые проблемы и направления дальнейших исследований.

Линейно-квадратичный регулятор (LQR) – один из наиболее распространенных методов управления БЛА. LQR-контроллеры широко используются в управлении как линейными, так и нелинейными системами благодаря таким преимуществам, как простота применения и высокая эффективность. Однако существует одна основная трудность, играющая значительную роль в определении коэффициента усиления управляющего сигнала: выбор подходящих весовых матриц. Выбор этих матриц, непосредственно влияющих на характеристики контроллера, обычно осуществляется методом проб и ошибок, что является трудоемким и длительным процессом. В [31] весовые матрицы были получены с использованием генетического алгоритма, дифференциальной эволюции, алгоритма роящихся частиц и алгоритма серых волков.

В [32] предложена модель системы автоматического управления скоростным режимом судна с нечётким регулятором. Особенностью указанной системы является многокритериальный подход к управлению скоростью судна, здесь использованы три критерия: критерий безопасности, экономический критерий и критерий расписания. Выработка компромиссных решений основана на расстановке приоритетов.

Среди нелинейных методов управления особое место занимает скользящее управление благодаря присущей ему робастности. В [33] рассмотрены семь различных подходов к проектированию контроллеров на основе скользящего управления для отслеживания и стабилизации систем БЛА, дан критический анализ опубликованных результатов исследований, определены перспективы и практические аспекты реализации скользящего управления системами БЛА. Перспективными направлениями исследований определены: 1) сочетание скользящего и предиктивного управления; 2) интеграции нейронных сетей и методов обучения с подкреплением в системы управления, что не только повысит устойчивость к возмущениям, но и позволит адаптироваться к сложным условиям морской среды.

Применение методов машинного обучения для повышения эффективности интеллектуальных систем управления полетом является активной областью исследований. Однако использование только контролируемых методов обучения идеальным не является из-за высокой стоимости обучающих данных и неточного представления характеристик БПС. Поэтому для разработки систем управления БПС всё чаще применяется гибридный подход на основе обучение с подкреплением. Но и у этого метода есть ограничения. Авторы [34] выделяют три основные проблемы. Первая, возможность достижение желаемой точности для операций управления ориентацией БПС, где требуются чрезвычайно точные последовательности управляющих сигналов, и даже незначительные отклонения от оптимальных управляющих сигналов могут вызвать нестабильность системы. Вторая проблема связана с надежностью и адаптацией, когда при переходе от моделируемой среды к физической реализации аппаратного обеспечения контроллеры на основе обучения с подкреплением неизбежно сталкиваются с неопределенностями из-за разрыва между моделированием и реальностью; это делает необходимым всестороннее исследование границ, в рамках которых контроллеры могут поддерживать безопасную функциональную работу. Третья проблема обусловлена необходимостью разработки оптимальных функций вознаграждения, отражающих эффективность управления ориентацией; при использовании нескольких критериев, таких как энергоэффективность или стабильность в условиях неполадок, задача разработки системы вознаграждений становится еще сложнее. Использую высокоточную среду моделирования GymFC (система настройки контроллера полётом с акцентом на управление ориентацией), авторы [34] проверили возможности трех известных алгоритмов глубокого обучения с подкреплением для управления ориентацией БЛА. Было показано, что подход на основе глубокого обучения с подкреплением, интегрированный с адаптивным механизмом оптимизации коэффициентов усиления, устраняет ограничения ПИД-регуляторов, заменяя их статическую природу интеллектуальной, динамической и адаптивной политикой управления.

Во время выполнения морских операций БЛА подвержен воздействию ветровых возмущений, что вызывает отклонение от заданной траектории. Для повышения устойчивости к ветровым возмущениям разработано множество стратегий управления БЛА, учитывающих эти возмущения. Для улучшения свойств подавления возмущений в системах БЛА в [35] изложен комбинированный подход к управлению, основанный на обобщенном пропорционально-интегральном наблюдателе пониженного порядка и негладком управлении.

Для отслеживания траектории БЛА в условиях сильных ветровых возмущений авторы [36] предлагают комбинированный нелинейный метод управления, основанный на динамической модели БЛА и модели турбулентного и сдвигового ветра. Для подсистемы позиционирования БЛА разрабатывается контроллер скользящего режима на основе переключения четырех квадрантов. Для сегмента распределения управления предложен распределитель управления на основе нелинейного программирования, а для подсистемы ориентации – нелинейный контроллер на основе глобального скользящего режима управления на базе функций Ляпунова.

В [37] обобщены методы проектирования контроллеров для БЛА, работающих в условиях воздействии внешних факторов, таких как ветровые

возмущения. Модель ветрового поля при работе БЛА декомпозирована на модель турбулентного ветра, модель сдвига ветра и другие типичные модели ветрового поля. Рассмотрены математические модели ветровых воздействий на роторы и на фюзеляж БЛА. Для изучения ветроустойчивости БЛА использованы различные методы управления.

Обнаружение морских объектов

Морские поисково-спасательные операции сложны из-за меняющейся погоды, динамичного состояния моря и ограниченной видимости. Разработка надёжных систем машинного обучения для этой задачи обычно требует больших объёмов помеченных данных обо всех возможных условиях проведения операций. Однако сбор и аннотирование таких данных является дорогостоящим мероприятием и часто невозможен в реальных морских ситуациях. В [38] рассмотрена проблема обнаружения человека в море с практической точки зрения, учитывая как технологические ограничения встроенных систем, так и сложность получения реальных маркированных данных; авторами разработан метод адаптации доменов для модели обнаружения на основе сегментации, которая оценивает вероятностную карту, указывающую на присутствие человеческих тел в море. Метод позволяет перейти от маркированного синтетического домена к реальному, немаркированному домену, используя нейронную сеть Domain-Adversarial Neural Network. Для экспериментов были выбраны два набора данных: SeaDronesSee – реальный набор данных и SynBASe – синтетический набор данных, созданный для воспроизведения ключевых характеристик SeaDronesSee, включая пространственное разрешение, количество особей на снимке (от 1 до 12) и имитируемые высоты полёта БЛА (от 40 до 300 м).

В сценариях поисково-спасательных операций на море преобладают такие проблемы, как большое количество мелких объектов, сложный фон, значительные различия в масштабах объектов и ограниченные аппаратные ресурсы [39].

Обнаружение объектов заключается в поиске интересующих объектов на изображении и определении их положения и размера. Обнаружение объектов в системе поиска и спасания на море значительно отличается от обнаружения объектов в других областях с точки зрения размера цели, условий окружающей среды и динамических изменений. Дрейфующие течения постоянно меняют положение выживших, в то время как волны, переменчивая погода, отражения от поверхности воды, блики, тени с разных углов обзора и быстро меняющиеся условия освещения могут частично или даже полностью скрывать их от поля зрения. Кроме того, внешний вид людей на море может значительно варьироваться в зависимости от одежды, плавучих устройств или стадий гипотермии, что добавляет ещё один уровень изменчивости к визуальному поиску [38]. Цели в морской среде обычно занимают очень небольшую долю изображения и подвержены влиянию морских волн, освещения и погодных условий, что создает значительные проблемы для использования традиционных алгоритмов обнаружения объектов.

Алгоритмы обнаружения объектов можно условно разделить на две категории: многоступенчатые (двухступенчатые) алгоритмы, идея которых заключается в том, чтобы сначала генерировать регионы-кандидаты, а затем выполнять классификацию, и одноступенчатые алгоритмы, идея которых заключается в непосредственном применении алгоритма к входному изображению и выводе категорий и соответствующих позиций. К классическим многоступенчатым алгоритмам относится RCNN (Region-based Convolutional Neural Network) и его модификации. Типичным представителем одноступенчатых алгоритмов являются модель Single Shot Multibox Detector (SSD) и модели серии YOLO. Как правило, они немного менее точны, чем двухступенчатые алгоритмы, но имеют более простую архитектуру, которая может облегчить обучение и больше подходит для обнаружения объектов в режиме реального времени [3].

Для решения задач обнаружения используются синтетические наборы данных, сгенерированные с помощью математической модели или алгоритма, иногда включающего реальные данные. Эти наборы предназначены для имитации предполагаемых статистических свойств реальных данных.

Обнаружение объектов на основе глубокого обучения для БНС является важным способом визуального восприятия. Тем не менее, современные методы плохо работают при выполнении сложных задач по обнаружению морских объектов. Также отсутствуют доступные наборы данных о сложных морских объектах для системы визуального восприятия БНС. Для решения этих проблем в [40] предложен усовершенствованный метод обнаружения морских объектов, основанный на модели YOLOv8. Кроме того, авторы [40] создали набор данных для обнаружения морских объектов, называемый MODD-13, который содержит более 9000 маркированных изображений. Набор учитывает характеристики категорий объектов (13 типов), разнообразие изображений и фона.

Для системы визуального восприятия БНС в [41] предложен набор данных для обнаружении морских судов, получивший название MVDD13. Набор содержит 35474 изображения, которые маркированы как суда 13 категорий.

В [39] эффективность алгоритма MES-YOLO оценивалась с помощью набора данных SeeDroneSea, предназначенного для разработки морских поисково-спасательных систем на базе БЛА. Набор данных включает 14227 RGB-изображений: 8930 для обучения, 1547 для проверки и 3750 для тестирования. Он включает изображения высотой от 5 до 260 метров и углами наклона стабилизатора от 0° до 90°, а также метаданные, такие как высота и угол. В наборе приведены объекты, снятые несколькими камерами такие как пловцы, лодки и буи.

Беспилотные летательные аппараты

Стремительное увеличение числа беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и их интеграция в повседневную практику делает их вполне доступным средством проведения эффективных поисково-спасательных операций на море. Использование БЛА для выполнения спасательных миссий

привлекло широкое внимание исследователей благодаря таким их преимуществам как высокие скорость и степень гибкости, невысокая стоимость [42].

Оснащенные датчиками и камерами с высоким разрешением БПЛА могут обрабатывать различные типы изображений – тепловые, мультиспектральные и видимого спектра – для обеспечения аэрофотосъемки окружающей среды. Это позволяет определять местонахождение потерпевших в морских авариях, оказывать помощь в их спасении, а также передавать их местоположение и состояние спасательным командам в режиме реального времени [43].

Дистанционное зондирование, выполняемое БЛА, имеет неоспоримое достоинство в виде быстрого реагирования и высокого разрешения изображения. Тем не менее, существуют некоторые неудобства в обнаружении морских объектов на основе изображений с БЛА из-за нехватки образцов для обучения и сложности морских изображений [44].

Помимо проблем с обработкой изображений в работе поискового БЛА существует и другие серьезные ограничения.

1. Морская среда предъявляет к системам управления БЛА серьёзные требования вследствие наличия сильного и продолжительного морского ветра и дождя, а также сложных аэродинамических возмущений. Указанные воздействия, как правило, обладают большой амплитудой, медленно изменяются во времени и носят длительный характер, что приводит к заметному ухудшению качества слежения за траекторией, увеличению энергопотребления и в ряде случаев может вызвать потерю устойчивости системы при отсутствии эффективных методов компенсации.

2. По сравнению с пилотируемыми аппаратами, БЛА ограничены коротким временем службы в морском поиске и не могут напрямую проводить спасательные операции. Обычно им требуется поддержка берегового центра или надводного судна для эффективного выполнения поставленных задач.

Беспилотные надводные суда

БНС – это автономная беспилотная морская система, которая осуществляет навигацию и выполняет задачи с помощью собственных средств управления. Эти системы относительно малы и экономичны и используются на больших участках морской поверхности в миссиях, требующих очень длительного нахождения в заданных районах. БНС широко используются в морских поисковых операциях благодаря своим преимуществам, таким как большая полезная нагрузка, большая дальность, высокая автономность, широкие навигационные и коммуникационные возможности, сравнительно невысокая стоимость [45].

Однако БНС, особенно небольшого размера, подвержены воздействию внешних возмущений, таких как морские волны, течения и ветер. Перечисленные факторы существенно снижают эффективность поиска и требуют разработки устойчивых структур управления, способных противостоять непредвиденным возмущениям.

Немаловажными проблемами для БНС являются внешние динамические и статические препятствия, а также сложность подъема этих аппаратов в нестационарной морской среде [2].

Гетерогенные системы

Согласно руководству Международной авиационной и морской поисково-спасательной службы (IAMSAR), скоординированный поиск с использованием моря и воздуха является одним из наиболее эффективных методов поиска, в котором используются летательные аппараты и надводные суда [46].

С развитием и применением беспилотного оборудования в навигации системы совместного использования БНС-БЛА вызывает всё больший интерес и пристальное внимание. Без сомнений, БНС играют значимую роль в морских поисковых операциях, но ограниченное поле обзора БНС всегда была серьезным недостатком. Применение БЛА может эффективно устранить этот недостаток, предоставляя БНС информацию об окружающей среде и предупреждая о потенциальных опасностях, таких как препятствия различного типа [47].

БНС могут столкнуться с трудностями при навигации в сложных и незнакомых водных средах. Эти проблемы могут возникать из-за отсутствия доступных региональных карт или изменением топографии водных поверхностей. При столкновении с этими трудностями высотный обзор, обеспечиваемый БЛА, может помочь БНС, определяя водную кромку незнакомой среды, прокладывать оптимальный путь для БНС [48].

В условиях сложной морской среды, меняющихся погодных условий, помех связи и других неблагоприятных факторов совместное управление отслеживанием заданной траектории может позволить БЛА и БНС обеспечивает плавный ход выполнения миссии. Для решения этой задачи в [49] предложен скользящий режим управления, а для аппроксимации неопределенной части модели используется сеть радиально-базисных функций. В [50] рассмотрена система, состоящая из нескольких БНС и БЛА выполняющих задачу следования по заданной траектории в условиях ограниченной коммуникации между участниками миссии.

Автономная стыковка БЛА с БНС служит основополагающим и жизненно важным элементом в решении задач морскими беспилотными системами. Использование визуального позиционирования затруднено сложными метеорологическими условиями, а низкая точность позиционирования не позволяет использовать GPS для этих целей. Для решения указанной проблемы в [45] предложено использовать адаптивный фильтр Калмана, объединяющий информацию о скорости, GPS и данные о позиционировании системы UWB (Ultra-Wide Band), там же представлена стратегия управления устойчивостью БНС по крену и тангажу, которая включает в себя данные о ветре и волнах. Кроме того, с использованием нечеткого ПИД-регулятора разработан контроллер стыковки БЛА с БНС.

В большинстве существующих исследований БЛА в процессе поиска просто находится над БНС, что, безусловно, может расширить поле обзора БНС, но не может в полной мере использовать высокую скорость БЛА [48]. Полёт БЛА вокруг БНС может повысить эффективность поисковой системы.

Например, для повышения ситуационной осведомленности БНС израильская система Seagull использует такую схему в разведывательных миссиях [47]. В [47] разработан метод управления круговым полётом БЛА вокруг БНС с фиксированным радиусом окружности в режиме реального времени при движении БНС по заданной траектории.

Заключение

В статье рассмотрены проблемы и средства выполнения морских поисковых операций автономными беспилотными системами. Указаны достоинства и недостатки каждого типа этих систем, проведен анализ научных исследований и инженерных приложений в области морских беспилотных поисковых систем.

Проблема текущих исследований в области БПС состоит в том, что в них полностью не учтены сложность и неопределенность реальных условий. Сохраняется разрыв между исследованиями и практикой. Эффективность и осуществимость теоретических моделей и алгоритмов в реальных приложениях требуют дальнейшей проверки и доработки. Поэтому будущие исследования должны больше сосредоточиться на практических вопросах

В десятистраничном обзоре невозможно рассмотреть все достижения, проблемы и решения в разработке автономных беспилотных поисковых систем при выполнении морских поисковых миссий. Вне обзора остались такие важные темы, как автономные подводные беспилотные аппараты, выполнение морских поисковых операций большой группой БПС, проблемы коммуникации и связи, выполнение поисковой миссии в условиях активного противодействия. Но это темы будущих обзоров.

Литература

1. Wang Y. Optimizing pre-occurrence maritime search and rescue system: A dynamic location-allocation model with considering spatiotemporal accessibility / Y. Wang, X. Qu, Z. Li // Ocean Engineering. – 2025. – Vol. 337. – 121964.
2. A survey of maritime unmanned search system: Theory, applications and future directions / J. Li, G. Zhang, C. Jiang, W. Zhang // Ocean Engineering. – 2023. – Vol. 285, Part 1. – 115359.
3. Vision-Based Learning for Drones: A Survey / J. Xiao, R. Zhang, Y. Zhang, M. Feroskhan // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – 2025. – Vol. 36. – P. 15601-15621.
4. Ходашинский И.А. Морские беспилотные поисковые системы. Пятилетний обзор современного состояния / И.А. Ходашинский, С.З. Май // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XXI Международной научно-практической конференции (26–28 ноября 2025 г.): в 3 ч. – Ч. 3. – Томск: ТУСУР, В-Спектр (ИП Бочкарева В.М.), 2025. С. 223-227.
5. Руководство МАМПС. Том II. Координация операций. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://aerohelp.ru/sysfiles/374_247.pdf, свободный (дата обращения: 18.02.2026).
6. Ship global path planning using jump point search and maritime traffic route extraction / L. Yang, J. Liu, Z. Liu, Y. Wang, Y. Liu, Q. Zhou // Expert Systems With Applications. – 2025. – Vol. 284. – 127885.
7. Cooperative search for dynamic targets by multiple UAVs with communication data losses / L. Li, X. Zhang, W. Yue, Z. Liu // ISA Transactions. – 2021. – Vol. 114. – P. 230-241.
8. Multi-UAV Coverage Path Planning Based on Hexagonal Grid Decomposition in Maritime Search and Rescue / S.-W. Cho, H.-J. Park, J.-H. Park, S. Kim // Mathematics. – 2022. – Vol. 10. – 83.
9. Coverage path planning for multiple unmanned aerial vehicles in maritime search and rescue operations / S.-W. Cho, H.-J. Park, H. Lee, D. H. Shim, S.-Y. Kim // Computers & Industrial Engineering. – 2021. – Vol. 161. – 107612.
10. Global path planning algorithm based on double DQN for multi-tasks amphibious unmanned surface vehicle / Y. Xiaofei, S. Yilun, L. Wei, Y. Hui, Z. Weibo, X. Zhengrong // Ocean Engineering. – 2022. – Vol. 266, Part 1. – 112809.
11. Xu X. Path Inference based on Voronoi Graph for Unmanned Maritime Vehicles // Robotics and Autonomous Systems. – 2024. – Vol. 173. – 104616.
12. Lee W. Visibility graph-based path-planning algorithm with quadtree representation / W. Lee, G.-H. Cho, T. Kim // Applied Ocean Research. –2021. – Vol. 117. – 102887.
13. Krell E. Autonomous Surface Vehicle energy-efficient and reward-based path planning using Particle Swarm Optimization and Visibility Graphs / E. Krell, S.A. King, L.R.G. Carrillo // Applied Ocean Research. – 2022. – Vol. 122. – 103125.
14. Ship path planning methods: A state-of-the-art survey / Z. Liu, J. Deng, B. Yu, L. Gan, L. Song, M. Zhang, H. Li, Z. Yang, Y. Shu // Ocean Engineering. – 2025. – Vol. 341. – 122599.
15. An automatic route design algorithm for intelligent ships based on a novel environment modeling method / W. Pan, X.-l. Xie, P. He, T.-t. Bao, M. Li // Ocean Engineering. – 2021. – Vol. 237. – 109603.
16. An improved A-star algorithm coupled with graph division and AIS data for ship path planning / T.-Y. Yang, L. Zou, Z.-X. Wu, W.-M. Chen // 2025. – Ocean Engineering. – Vol. 330. – 121234.
17. Cetinsaya B. From PID to swarms: A decade of advancements in drone control and path planning - A systematic review (2013 – 2023) / B. Cetinsaya, D. Reiners, C. Cruz-Neira // Swarm and Evolutionary Computation. 89. 2024. 101626.
18. Ходашинский И.А. Методы повышения эффективности роевых алгоритмов оптимизации // Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 6. – С. 3-45.
19. Cooperative path following control of USV-UAVs with genetic algorithm extended state observer / H. Zhang, X. Zhang, H.T. Xu, C.G. Soares // Ocean Engineering. – 2025. – Vol. 320. – 120332.
20. Phung M.D. Safety-enhanced UAV path planning with spherical vector-based particle swarm optimization / M.D. Phung, Q.P. Ha // Applied Soft Computing. – 2021. – Vol. 107. – 107376.
21. Coverage path planning of heterogeneous unmanned aerial vehicles based on ant colony system / J. Chen, F. Ling, Y. Zhang, T. You, Y. Liu, X. Du // Swarm and Evolutionary Computation. – 2022. – Vol. 69. – 101005.

22. Miao F. Three-Dimensional Path Planning of UAVs for Offshore Rescue Based on a Modified Coati Optimization Algorithm / F. Miao, H. Li, X. Mei // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12. – 1676.
23. Karthik K. Improved Green Anaconda Optimization Algorithm-based Coverage Path Planning Mechanism for heterogeneous unmanned aerial vehicles / K. Karthik, C. Balasubramanian // Sustainable Computing: Informatics and Systems. – 2024. – Vol. 42. – 100961.
24. Май С.З. Алгоритм осьминога для моделирования движения группы беспилотных летательных аппаратов при выполнении поисковой миссии на море / С.З. Май, И.А. Ходашинский // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. –2024. – Т. 27. № 4. – С. 127-135.
25. 3D multi-UAV cooperative velocity-aware motion planning /Y. Hu, Y. Yao, Q. Ren, X. Zhou // Future Generation Computer Systems. – 2020. – Vol. 102. – P. 762-774.
26. Yu X. Reinforcement learning-based multi-strategy cuckoo search algorithm for 3D UAV path planning / X. Yu, W. Luo // Expert Systems With Applications. – 2023. – 223. –119910.
27. Route planning for UAVs maritime search and rescue considering the targets moving situation / H. Wen, Y. Shi, S. Wang , T. Chen, P. Di, L. Yang // Ocean Engineering. – 2024. – Vol. 310. – 118623.
28. Miao F. Real-time path planning for unmanned aerial vehicles in complex three-dimensional dynamic environments using an enhanced fuzzy neural fluid dynamical system / F. Miao, H. Li // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2026. – Vol. 164, Part A. – 113274.
29. Филатов В.И. Прототипирование системы автоматического управления курсом судна-робота в условиях возмущений / В.И. Филатов, В.В. Астреин // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 2 часть 1. – С. 367–375.
30. Lopez-Sanchez I. PID control of quadrotor UAVs: A survey / I. Lopez-Sanchez, J. Moreno-Valenzuela // Annual Reviews in Control. – 2023. – Vol. 56. – 100900.
31. Ata B. Comparison of optimization approaches on linear quadratic regulator design for trajectory tracking of a quadrotor / B. Ata, M.C. Gencal // Evolutionary Intelligence. – 2024. – Vol. 17. – P. 3225–3240.
32. Филатов В.И. Синтез нечёткой системы автоматического управления скоростным режимом автономного судна при следовании по программной траектории / В.И. Филатов, В.В. Астреин // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 1 часть 1. – С. 245–253.
33. Yesmin A., Sinha A. Sliding Mode Controller for Quadcopter UAVs: A Comprehensive Survey // Drones. – 2025. – Vol. 9. Iss. 9. – 625.
34. Deep reinforcement learning for UAV attitude control via adaptive gain optimization / M. Zorain, F.S. Khan, N. Hasany, Z.M.U. Din, J.Z. Gul // Applied Intelligence. – 2025. – Vol. 55. – 1092.
35. Li S. A finite time composite control method for quadrotor UAV with wind disturbance rejection / S. Li, Z. Sun, M.A. Talpur // Computers and Electrical Engineering. – 2022. – Vol. 103. – 108299.
36. Trajectory tracking control for quadrotor under wind disturbance based on four-quadrant switch and NMPC / J. Liu, L. Wang, D. Yuan, Z. Fan // Journal of the Franklin Institute. – 2026. – Vol. 363. – 108420.
37. Shen J. Review on wind resistance for quadrotor UAVs: Modeling and controller design / J. Shen, B. Wang, B.M. Chen, R. Bu, B. Jin // Unmanned Systems. – 2023. – Vol. 11. – P. 5–15.
38. Martinez-Esteso J.P. Enhancing maritime search and rescue: Incremental unsupervised domain adaptation with synthetic data and pseudo-labeling / J.P. Martinez-Esteso, F.J. Castellanos, A.J. Gallego // Expert Systems with Applications. – 2026. – Vol. 305. – 130864.
39. MES-YOLO: An efficient lightweight maritime search and rescue object detection algorithm with improved feature fusion pyramid network / Z. Jin, T. He, L. Qiao, J. Duan, X. Shi, B. Yan, C. Guo // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 2025. – Vol. 109. – 104453.
40. YOLO-MRS: An efficient deep learning-based maritime object detection method for unmanned surface vehicles / C. Yu, H. Yin, C. Rong, J. Zhao, X. Liang, R. Li, X. Mo // Applied Ocean Research. – 2024. – Vol. 153. – 104240.
41. Marine vessel detection dataset and benchmark for unmanned surface vehicles / N. Wang, Y. Wang, Y. Wei, B. Han, Y. Feng // Applied Ocean Research. – 2024. – Vol. 142. – 103835.
42. Pre-occurrence location-allocation-configuration of maritime emergency resources considering shipborne unmanned aerial vehicle (UAV) / Y. Hu, M. Wang, X. Guo, V.F. Lukinykh // Omega. – 2025. – Vol. 131. – 103231.
43. Maritime Search and Rescue Missions with Aerial Images: A Survey / J.P. Martinez-Esteso, F.J. Castellanos, J. Calvo-Zaragoza, A.J. Gallego // Computer Science Review. – 2025. – Vol. 57. – 100736.
44. Geng W. An efficient detector for maritime search and rescue object based on unmanned aerial vehicle images // W. Geng, J. Yi, L. Cheng // Displays. – 2025. – Vol. 87. – 102994.
45. Design and experiment of a sea-air heterogeneous unmanned collaborative system for rapid inspection tasks at sea / T. Ennong, L. Ye, M. Teng, L. Yulei, L. Yueming, C. Jian // Applied Ocean Research. – 2024. – Vol. 143. – 103856.
46. Руководство МАМПС. Том III. Подвижные средства. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.sparcatc.ru/files/ICAO_Doc-9731-Rukovodstvo-MAMPS-t.3.pdf, свободный (дата обращения: 18.02.2026).
47. Robust encircling following control for the cooperative marine surface-aerial plant: A gain-related adaptive prescribed performance scheme / G. Zhang, Y. Xu, J. Li, M. Montebello, H. Wang // Ocean Engineering. – 2025. – Vol. 338. – 121965.
48. A USV-UAV cooperative trajectory planning algorithm with hull dynamic constraints / T. Huang, Z. Chen, Gao W., Z. Xue, Y. Liu // Sensors. – 2023. – Vol. 23 (4). – 1845.
49. Xu W. Cooperative trajectory tracking control of USV-UAV with non-singular sliding mode surface and RBF neural network / W. Xu, X. Zhang, Z. Miao // Ocean Engineering. – 2025. – Vol. 337. – 121872.

50. Robust control for cooperative path following of marine surface-air vehicles with a constrained inter-vehicles communication / J. Li, G. Zhang, W. Zhang, X. Zhang // Ocean Engineering. – 2024. – Vol. 308. – 118240.

References

1. Wang Y., Qu X., Li Z. Optimizing pre-occurrence maritime search and rescue system: A dynamic location-allocation model with considering spatiotemporal accessibility. Ocean Engineering. 2025. Vol. 337. 121964.
2. Li J., Zhang G., Jiang C., Zhang W. A survey of maritime unmanned search system: Theory, applications and future directions. Ocean Engineering. 2023. Vol. 285, Part 1. 115359.
3. Xiao J., Zhang R., Zhang Y., Feroskhan M. Vision-Based Learning for Drones: A Survey. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2025. Vol. 36. P. 15601-15621.
4. Hodashinsky I.A., Mai S.Z. Morskie bespilotnye poiskovye sistemy. Pyatiletnij obzor sovremennogo sostoyaniya. Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya: materialy dokladov XXI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii (26–28 noyabrya 2025 g.): v 3 ch. Ch. 3. Tomsk: TUSUR, V-Spektr (IP Bochkareva V.M.), 2025. S. 223-227.
5. IAMSAR Manual. Volume II. Mission Co-ordination. [Electronic resource]. – Access mode: https://aerohelp.ru/sysfiles/374_247.pdf, free (date of access: 18.02.2026).
6. Yang L., Liu J., Liu Z., Wang Y., Liu Y., Zhou Q. Ship global path planning using jump point search and maritime traffic route extraction. Expert Systems With Applications. 2025. Vol. 284. 127885.
7. Li L., Zhang X., Yue W., Liu Z. Cooperative search for dynamic targets by multiple UAVs with communication data losses. ISA Transactions. 2021. Vol. 114. P. 230-241.
8. Cho S.-W., Park H.-J., Park J.-H., Kim S. Multi-UAV Coverage Path Planning Based on Hexagonal Grid Decomposition in Maritime Search and Rescue. Mathematics. 2022. Vol. 10. 83.
9. 7. Coverage path planning for multiple unmanned aerial vehicles in maritime search and rescue operations / S.-W. Cho, H.-J. Park, H. Lee, D. H. Shim, S.-Y. Kim. Computers & Industrial Engineering. 2021. Vol. 161. 107612.
10. Xiaofei Y., Yilun S., Wei L., Hui Y., Weibo Z., Zhengrong X. Global path planning algorithm based on double DQN for multi-tasks amphibious unmanned surface vehicle. Ocean Engineering. 2022. Vol. 266, Part 1. 112809.
11. Xu X. Path Inference based on Voronoi Graph for Unmanned Maritime Vehicles. Robotics and Autonomous Systems. 2024. Vol. 173. 104616.
12. Lee W., Choi G.-H., Kim T. Visibility graph-based path-planning algorithm with quadtree representation. Applied Ocean Research. 2021. Vol. 117. 102887.
13. Krell E. King S.A., Carrillo L.R.G. Autonomous Surface Vehicle energy-efficient and reward-based path planning using Particle Swarm Optimization and Visibility Graphs. Applied Ocean Research. 2022. Vol. 122. 103125.
14. Liu Z., Deng J., Yu B., Gan L., Song L., Zhang M., Li H., Yang Z., Shu. Ship path planning methods: A state-of-the-art survey Ocean Engineering. 2025. Vol. 341. 122599.
15. Pan W., Xie X.-l., He P., Bao T.-t., Li M. An automatic route design algorithm for intelligent ships based on a novel environment modeling method. Ocean Engineering. 2021. Vol. 237. 109603.
16. Yang T.-Y., Zou L., Wu Z.-X., Chen W.-M. An improved A-star algorithm coupled with graph division and AIS data for ship path planning. 2025. Ocean Engineering. Vol. 330. 121234.
17. Cetinsaya B. Reiners D., Cruz-Neira C. From PID to swarms: A decade of advancements in drone control and path planning - A systematic review (2013 – 2023). Swarm and Evolutionary Computation. 89. 2024. 101626.
18. Hodashinsky I. A.Methods for improving the efficiency of swarm optimization algorithms. A survey. Automation and Remote Control. 2021. Vol. 82. Iss. 6. C. 935-967.
19. Zhang H., Zhang X., Xu H.T., Soares C.G. Cooperative path following control of USV-UAVs with genetic algorithm extended state observer. Ocean Engineering. 2025. Vol. 320. 120332.
20. Phung M.D., Ha Q.P. Safety-enhanced UAV path planning with spherical vector-based particle swarm optimization. Applied Soft Computing. 2021. Vol. 107. 107376.
21. Chen J., Ling F., Zhang Y., You T., Liu Y., Du X. Coverage path planning of heterogeneous unmanned aerial vehicles based on ant colony system. Swarm and Evolutionary Computation. 2022. Vol. 69. 101005.
22. Miao F., Li H., Mei X. Three-Dimensional Path Planning of UAVs for Offshore Rescue Based on a Modified Coati Optimization Algorithm. Journal of Marine Science and Engineering. 2024. Vol. 12. 1676.
23. Karthik K., Balasubramanian C. Improved Green Anaconda Optimization Algorithm-based Coverage Path Planning Mechanism for heterogeneous unmanned aerial vehicles. Sustainable Computing: Informatics and Systems. 2024. Vol. 42. 100961.
24. Mai S.Z., Hodashinsky I.A. Algoritm os'minoga dlya modelirovaniya dvizheniya gruppy bespilotnyh letatel'nyh apparatov pri vypolnenii poiskovoj missii na more. Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki. 2024. T. 27. № 4. S. 127-135.
25. Hu Y., Yao Y., Ren Q., Zhou X. 3D multi-UAV cooperative velocity-aware motion planning. Future Generation Computer Systems. 2020. Vol. 102. P. 762-774.
26. Yu X., Luo W. Reinforcement learning-based multi-strategy cuckoo search algorithm for 3D UAV path planning. Expert Systems with Applications. 2023. 223.119910.
27. Wen H., Shi Y., Wang S., Chen T., Di P., Yang L. Route planning for UAVs maritime search and rescue considering the targets moving situation. Ocean Engineering. 2024. Vol. 310. 118623.
28. Miao F., Li H. Real-time path planning for unmanned aerial vehicles in complex three-dimensional dynamic environments using an enhanced fuzzy neural fluid dynamical system. Engineering Applications of Artificial Intelligence.2026. Vol. 164. Part A. 113274.
29. Filatov V.I., Astrein V.V. Prototype of Automatic Heading control system of Robotized-Vessel under the influence of outer factor. Marine intellectual technologies. 2025. No. 2 part 1. P. 367-375.

30. Lopez-Sanchez I., Moreno-Valenzuela J. PID control of quadrotor UAVs: A survey. Annual Reviews in Control. 2023. Vol. 56. 100900.
31. Ata B., Gencal M.C. Comparison of optimization approaches on linear quadratic regulator design for trajectory tracking of a quadrotor. Evolutionary Intelligence. 2024. Vol. 17. P. 3225–3240.
32. Filatov V.I., Astrein V.V. Fuzzy automatic Control System Synthesis for Ship's Speed mode during sailing through program trajectory. Marine intellectual technologies. 2023. No 1 part 1. P. 245-253.
33. Yesmin A., Sinha A. Sliding Mode Controller for Quadcopter UAVs: A Comprehensive Survey. Drones. 2025. Vol. 9. Iss. 9. 625.
34. Zorain M., Khan F.S., Hasany N., Din Z.M.U., Gul J.Z. Deep reinforcement learning for UAV attitude control via adaptive gain optimization. Applied Intelligence. 2025. Vol. 55. 1092.
35. Li S., Sun Z., Talpur M.A. A finite time composite control method for quadrotor UAV with wind disturbance rejection. Computers and Electrical Engineering. 2022. Vol. 103. 108299.
36. Liu J., Wang L., Yuan D., Fan Z. Trajectory tracking control for quadrotor under wind disturbance based on four-quadrant switch and NMPC. Journal of the Franklin Institute. 2026. Vol. 363. 108420.
37. Shen J., Wang B., Chen B.M., Bu R., Jin B., Shen J. Review on wind resistance for quadrotor UAVs: Modeling and controller design. Unmanned Systems. 2023. Vol. 11. P. 5–15.
38. Martinez-Esteso J.P. Castellanos F.J., Gallego A.J. Enhancing maritime search and rescue: Incremental unsupervised domain adaptation with synthetic data and pseudo-labeling. Expert Systems with Applications. 2026. Vol. 305. 130864.
39. Jin Z., He T., Qiao L., Duan J., Shi X., Yan B., Guo C. MES-YOLO: An efficient lightweight maritime search and rescue object detection algorithm with improved feature fusion pyramid network. Journal of Visual Communication and Image Representation. 2025. Vol. 109. 104453.
40. Yu C., Yin H., Rong C., Zhao J., Liang X., Li R., Mo X. YOLO-MRS: An efficient deep learning-based maritime object detection method for unmanned surface vehicles. Applied Ocean Research. 2024. Vol. 153. 104240.
41. Wang N., Wang Y., Wei Y., Han B., Feng Y. Marine vessel detection dataset and benchmark for unmanned surface vehicles. Applied Ocean Research. 2024. Vol. 142. 103835.
42. Hu Y., Wang M., Guo X., Lukinykh V.F. Pre-occurrence location-allocation-configuration of maritime emergency resources considering shipborne unmanned aerial vehicle (UAV). Omega. 2025. Vol. 131. 103231.
43. Martinez-Esteso J.P.,. Castellanos F.J, Calvo-Zaragoza J., Gallego A.J. Maritime Search and Rescue Missions with Aerial Images: A Survey. Computer Science Review. 2025. Vol. 57. 100736.
44. Geng W., Yi J., Cheng L. An efficient detector for maritime search and rescue object based on unmanned aerial vehicle images. Displays. 2025. Vol. 87. 102994.
45. Ennong T., Ye L., Teng M., Yulei L., Yueming L., Jian C. Design and experiment of a sea-air heterogeneous unmanned collaborative system for rapid inspection tasks at sea. Applied Ocean Research. 2024. Vol. 143. 103856.
46. IAMSAR Manual. Volume III. Mobile Facilities. [Electronic resource]. – Access mode: https://www.sparcatc.ru/files/ICAO_Doc-9731-Rukovodstvo-MAMPS-t.3.pdf, free (date of access: 18.02.2026).
47. Zhang G., Xu Y., Li J., Montebello M., Wa H. Robust encircling following control for the cooperative marine surface-aerial plant: A gain-related adaptive prescribed performance scheme ng. Ocean Engineering. 2025. Vol. 338. 121965.
48. Huang T., Chen Z., Gao W., Xue Z., Liu Y. A USV-UAV cooperative trajectory planning algorithm with hull dynamic constraints. Sensors. 2023. Vol. 23 (4). 1845.
49. Xu W., Zhang X., Miao Z. Cooperative trajectory tracking control of USV-UAV with non-singular sliding mode surface and RBF neural network. Ocean Engineering. 2025. Vol. 337. 121872.
50. Li J., Zhang G., Zhang W., Zhang X. Robust control for cooperative path following of marine surface-air vehicles with a constrained inter-vehicles communication. Ocean Engineering. 2024. Vol. 308. 118240.

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

Май Суан Зунг, аспирант кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050, e-mail: maixuandung85@gmail.com

Xuan Dung Mai, graduate student, Department of Computer Systems in Control and Design (CSCD), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), Lenin Ave., 40, Tomsk, Russia, 634050, e-mail: maixuandung85@gmail.com

Ходашинский Илья Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры КСУП ТУСУРа, Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050, e-mail: hodashn@rambler.ru

Шурыгин Юрий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой КСУП ТУСУРа, Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050, e-mail: yuriy.shurygin@tusur.ru

Ilya A. Hodashinsky, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Computer-Aided Control Systems, TUSUR, Lenin Ave., 40, Tomsk, Russia, 634050, e-mail: hodashn@rambler.ru

Yuri A. Shurygin, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Computer-Aided Control Systems, TUSUR, Lenin Ave., 40, Tomsk, Russia, 634050, e-mail: yuriy.shurygin@tusur.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.05.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 09.07.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 20.07.2026.

Научная статья
УДК 004.822:656.61.08, 519.21, 004.89
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.053

Семантическое пространство знаний системы поддержки принятия решений по безопасности морских транспортных систем

Шаталова Н.В.[1] shatillen@mail.ru, **Бородина О.В.**[1] borodinaov@gmail.ru,
[1]Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. Создание систем поддержки принятия решений о безопасности движения на море на современном этапе использую инструменты искусственного интеллекта. Модели поиска знаний о безопасности на морском транспорте строятся на семантике эксперта, проводящего токенизацию и тонкую настройку системы поддержки принятия решений. Цель данной публикации заключается в создании концепции семантической модели знаний о безопасности движения для отраслевой LLM-модели морских транспортных систем.
В работе предложен алгоритм инженерно-исследовательского проекта создания языковой модели знаний для решений проблем безопасности морских транспортных систем. Аргументируется и предлагается модель источников знаний. Авторами приведен наглядный пример отражающий процесс представления ключевых слов семантического пространства в виде векторов и способ их смыслового приближения путём обучения нейросети. Кроме того, работа содержит обзор некоторых подходов к оценке семантической близости документов из базы знаний по безопасности морских транспортных систем и приводится методология соблюдения семантики при создании набора данных к морским языковым моделям. Результатом данной публикации являются обзор и анализ эффективности применения официальной классификации стандартов ИМО под решение задачи навигации в акватории морского порта. Заключение, к которому приходят авторы, - семантика морских транспортных систем требует стандартизации набора данных для обучения языковых моделей.
Ключевые слова: морская транспортная система, семантическое пространство знаний, безопасность, система поддержки принятия решений, токен.
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: Шаталова Н.В., Бородина О.В. Семантическое пространство знаний системы поддержки принятия решений по безопасности морских транспортных систем, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 249—258. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.053

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.053

Semantic Knowledge Space of the Marine Transportation Systems Safety Decision Support System

Natalia V. Shatalova[1] shatillen@mail.ru, **Olga V. Borodina**[1] borodinaov@gmail.ru
[1]Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation

Abstract. The creation of systems to support decision-making on traffic safety at sea at the present stage uses artificial intelligence tools. Maritime safety knowledge retrieval models are built on the semantics of an expert conducting tokenization and fine-tuning of a decision support system. The purpose of this publication is to conceptualize a semantic traffic safety knowledge model for an industry LLM model of marine transportation systems. The paper proposes an algorithm for an engineering research project to create a language knowledge model for solving security problems of marine transport systems. The model of knowledge sources is argued and proposed. The authors give a visual example reflecting the process of representing the keywords of the semantic space in the form of vectors and the method of their semantic approximation by training a neural network. In addition, the paper contains an overview of some approaches to assessing the semantic proximity of documents from the knowledge base on the safety of marine transport systems and provides a methodology for observing semantics when creating a dataset for marine language models. The result of this publication is an overview and analysis of the effectiveness of the application of the official classification of IMO standards for solving the problem of navigation in the sea port. The conclusion reached by the authors is that the semantics of marine transport systems require standardization of the dataset to train language models.
Keywords: marine transportation system, semantic knowledge space, security, decision support system, token.
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).

© Шаталова Н.В., Бородина О.В. 2026

For citation: Natalia V. Shatalova, Olga V. Borodina, Semantic Knowledge Space of the Marine Transportation Systems Safety Decision Support System, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 249—258. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.053

Введение

Текущую ситуацию на транспорте в целом и в морских транспортных системах можно назвать переходной на совместное использование акваторий и морского пространства беспилотными и пилотируемыми транспортными средствами. Де-факто Международная морская организация (IMO) является координатором в области единообразия понятий, терминов, концепций, стратегий и политик в области безопасных передвижений; многолетний опыт и прилежное применение уроков, извлеченных из мероприятий по обеспечению безопасности (выписки из операционных документов, протоколы и пр.) и также является тем отраслевым фундаментом экспертных знаний, на которых формируются стандарты безопасности.

Однако де-факто, системы поддержки принятия операционных и стратегических решений, основанные на технологиях искусственного интеллекта (ИИ), это перспектива ближайших 5-7 лет и отечественные специалисты прикладывают максимум усилий чтобы оценить эффективность применения технологий ИИ к решению оперативных задач транспорта.

Технологический прогресс в морском секторе одновременно сталкивается с цифровой трансформацией при ограниченности связи. Появление технологий автономных судов вносит дополнительные сложности в кибербезопасность, соблюдение нормативных требований и системную интеграцию [2] при организации движения морских транспортных систем.

Ключевым направлением развития ИИ являются технологии построения языковых моделей для автоматической поддержки принятия решений судоводителей.

В акватории порта обстановка меняется мгновенно – плотный трафик, узкие фарватеры, швартовки, влияние течений и ветра [7]. Задача – приблизиться к созданию языковой модели поддержки принятия решений о движении судоводителем в акватории морского порта.

Судовождение и обеспечение безопасности мореплавания тесно связано с навигационной обстановкой. Под навигационной ситуацией в общем случае необходимо понимать неповторимую совокупность мгновенных значений характеристик взаимосвязанных, субъективных и объективных компонентов, имеющих отношение к безопасности судовождения в определённый момент времени [8].

Цель языковой модели системы поддержки принятия решений (СППР) не заменить судоводителя, а разгрузить его от рутины, дать полную картину ситуации и подсветить риски, чтобы решение было взвешенным и безопасным.

Источники знаний для отраслевых языковых моделей

Отрасль сталкивается с растущим объемом знаний на фоне дефицита квалифицированных кадров и все более усложняющихся нормативных требований, где суда должны соответствовать пересекающимся юрисдикциям и часто обновляемым международным стандартам, таким как MARPOL и SOLAS.

Глобальным регулятором для международного судоходства является специализированное учреждение ООН – Международная морская организация (IMO).

В морской сфере роль аккумуляции единых правил (стандарты и рекомендации) выполняет обширная система из более чем 50 международных конвенций, кодексов и протоколов, разработанных под эгидой IMO. Приведем ключевые из них, сгруппированные по основным сферам регулирования:

Безопасность мореплавания – основа морского права, обеспечивающая безопасность судов, экипажей и пассажиров.

SOLAS 1974 [4]. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море: самый важный договор, устанавливающий минимальные стандарты для конструкции, оборудования и эксплуатации судов.

COLREG 1972 [5]. Международные правила предупреждения столкновений судов в море: регулирует «морское движение».

STCW [6]. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты: устанавливает требования к квалификации и сертификации моряков.

SAR 1979 [7]. Международная конвенция по поиску и спасанию на море: координирует поисково-спасательные операции.

Интересно, что IMO и ИКАО совместно разработали Международное авиационное и морское руководство по поиску и спасанию (IAMSAR) для единого подхода в обеих сферах.

Защита окружающей среды. Морской аналог норм по защите окружающей среды включает целый ряд конвенций:

MARPOL 73/78 [8]. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов: главный документ, регулирующий предотвращение загрязнения моря нефтью, химикатами, мусором и выбросами в атмосферу.

BWM 2004 [9]. Конвенция о контроле судовых балластных вод и осадков: предотвращает распространение вредных водных организмов.

AFS 2001 [10]. Конвенция о контроле вредных противообрастающих систем на судах: запрещает использование токсичных красок.

Упрощение процедур и формальностей. Аналогом Приложения 9 к Чикагской конвенции (FAL) является:

Конвенция FAL 1965 [11]. Конвенция по облегчению международного судоходства: устанавливает стандартные формальности и правила для упрощения прибытия, стоянки и отхода судов, включая электронный обмен данными. С 2024 года обязателен обмен информацией через «единое окно».

Безопасность:

SUA 1988 [12]. Конвенция о борьбе с незаконными актами, направленными против безопасности морского судоходства, направленная на борьбу с терроризмом и пиратством на море.

Ответственность и компенсация. Конвенции, регулирующие вопросы ответственности за ущерб, аналогичные авиационным Варшавской и Монреальской конвенциям:

CLC [13]. Конвенция о гражданской ответственности за ущерб от загрязнения нефтью.

PAL 1974 [14]. Афинская конвенция о перевозке морем пассажиров и их багажа.

Таким образом, IMO создала разветвленную систему конвенций, каждая из которых закрывает свою конкретную область. Эта система, хотя и более фрагментирована, охватывает все те же ключевые аспекты: безопасность, экологию, упрощение процедур, квалификацию персонала и безопасность.

Клубы взаимного страхования (P&I Clubs – Protection and Indemnity Clubs) играют уникальную роль. В отличие от привычных коммерческих страховых компаний, это некоммерческие объединения самих судовладельцев, созданные по принципу «взаимной кассы». Они страхуют самые тяжелые риски: экологические катастрофы (разливы нефти), столкновения судов, повреждения портовой инфраструктуры, гибель грузов и травмы экипажа.

Кроме того, важным источником знаний являются документы операционного характера, – от бортовых журналов, до записей переговоров. Эти наборы данных требуют тонкой настройки при формировании базы данных для обучения языковых моделей. Чем точнее будет смысловая настройка процесса токенизации, тем более точно ответы отраслевой языковой модели будут соответствовать запросам пользователя.

Экспертные знания, определяющие эвристику знаний для языковой модели, можно разделить на несколько категорий: разборы инцидентов, руководства по перевозке опасных и специфических грузов, медицинская и психологическая аналитика.

Клубы не называют имен судов и компаний (из-за конфиденциальности), но детально реконструируют аварии. Они используют 3D-моделирование, схемы движения судов по данным АИС (AIS) и выписку из регистраторов данных рейса. Это позволяет понять ментальные ловушки, в которые попал экипаж перед аварией.

Транспортировка грузов – главная зона риска. На сайтах клубов есть подробнейшие гайды по физике и химии процесса перевозки опасных и специфических грузов:

– как избежать самовозгорания угля или древесных паллет в трюмах;

– как контролировать разжижение (liquefaction) железорудного концентрата или никелевой руды (из-за чего суда могут мгновенно потерять остойчивость и перевернуться);

– правила температурного режима при перевозке сжиженного природного газа (СПГ).

Существенная часть выплат клубов связана со здоровьем моряков. Клубы публикуют аналитику по снижению травматизма, правильной эргономике на рабочем месте, а в последние годы – огромные разделы посвящены ментальному здоровью экипажей (борьба со стрессом, усталостью и депрессией в длительных рейсах). Таким образом медицинская аналитика, как часть системы принятия решений, делает статистику важной частью базы знаний морских транспортных систем.

Эвристика в работе экспертов над базами данных и знаний заключается в формировании упрощённых правил обработки данных, которые языковая модель использует для выработки рекомендаций по принятию решений. Эксперт в процессе настройки языковой модели должен отфильтровать нерелевантные варианты и выстроить логику рассуждения (таблица).

Таблица

Модель семантического пространства знаний системы поддержки принятия решений о безопасности движения для отраслевой LLM-модели морских транспортных систем

Раздел	Элементы базы знаний	Описание и назначение для языковой модели СППР	Примеры источников / данных
Стандарты ИМО	MARPOL, SOLAS	Базовые международные нормы экологической и эксплуатационной безопасности; задают «нижнюю планку» требований и обязательные процедуры. Критичны для валидации решений модели (проверка на соответствие нормам)	Конвенции ИМО, резолюции Ассамблеи, циркуляры MSC/MEPC, руководства по внедрению стандартов
	Стандарты по организации движения в акватории морского порта	Регламентируют безопасные схемы движения, зоны разделения потоков, скоростные режимы, правила расхождения и швартовки в стеснённых условиях. Нужны для моделирования сценариев в портах и оценки рисков столкновений	Портовые правила, локальные циркуляры, руководства по управлению движением судов (VTS), портовые планы движения
	Аналитические наборы данных по безопасности движения и проблем на морском транспорте	Статистика аварийности, тренды по типам инцидентов, корреляции с погодными и навигационными условиями. Позволяют модели выявлять паттерны рисков и	Отчёты ИМО, отчёты классификационных обществ, базы данных аварий, отчёты портовых властей

		прогнозировать опасные ситуации	
	Руководства по перевозке опасных и специфических грузов (в части требований ИМО)	Технические требования к упаковке, креплению, вентиляции, контролю температуры и влажности; классификация грузов по IMO IMDG Code. Ключевой слой для оценки допустимости перевозки и выбора мер безопасности	IMDG Code, циркуляры ИМО по отдельным грузам, руководства по безопасной перевозке
Материалы Клубов (P&I Clubs)	Разборы инцидентов с 3D-моделированием и данными AIS	Детальные реконструкции аварий без раскрытия конфиденциальных данных; анализ ментальных ловушек и ошибок экипажа. Позволяют модели учиться на реальных кейсах и распознавать «типовые» цепочки ошибок	Отчётные материалы клубов, визуализации инцидентов, схемы треков судов, таймлайны событий
	Гайды по физике и химии перевозки грузов (самовозгорание, разжижение, температурный режим)	Практические методики контроля состояния груза, пороговые значения параметров, чек-листы мониторинга. Нужны для генерации оперативных рекомендаций экипажу	Внутренние руководства клубов, технические бюллетени, памятки по конкретным грузам (уголь, паллеты, рудные концентраты, СПГ)
	Медицинская и психологическая аналитика	Методики снижения травматизма, эргономика рабочих мест, управление усталостью и стрессом, протоколы первой помощи. Важны для учета человеческого фактора в СППР	Руководства клубов по охране здоровья, отчёты по расследованию травм, рекомендации по режиму труда и отдыха
Документы операционного характера	Бортовые журналы, записи переговоров, судовые отчёты	Первичные данные о ходе рейса, принятых решениях, изменениях обстановки. Служат основой для тонкой настройки токенизации и семантической разметки; позволяют модели «понимать» язык судовой документации	Судовые журналы, радиопереговоры (VHF), отчёты капитана, записи вахтенного помощника
	Регистраторы данных рейса (VDR) и выписки из них	Объективные данные о параметрах движения, работе оборудования, действиях экипажа. Критичны для верификации гипотез модели и построения цифровых двойников сценариев.	Выписки VDR, логи навигационного оборудования, телеметрия
	Оперативные чек-листы, инструкции по действиям в нештатных ситуациях	Шаблоны действий при авариях, тревогах, ухудшении погоды. Позволяют модели выдавать готовые алгоритмы действий, адаптированные под конкретную ситуацию	Судовые чек-листы, планы действий в чрезвычайных ситуациях (SOPEP, SMCP), инструкции производителя оборудования
	Данные АИС (AIS) и навигационные треки	Информация о положении, скорости, курсе судов в реальном времени; используются для анализа трафика, выявления конфликтных ситуаций и прогнозирования сближений	Потоки AIS, исторические треки, данные систем управления движением судов (VTS)

Ландшафт современных языковых моделей

Ландшафт языковой модели интеллектуальной системы поддержки знаний о безопасности на море в его простейшем случае можно изобразить как график многомерной функции, где вместо y=f(x) имеется L=L(θ1, θ2, …, θN), а задача обучения – найти точку с минимальным L.

Однако количество подзадач модели больших транспортных систем делает последнюю полимодальной по своей сути. Нивелирование рисков погрешностей в работе полимодальных моделей достигается за счет «тонкой» настройки ландшафта состояний модели исходя из субъективных эвристик эксперта и пониманий экспертом способа достижения безопасного состояния морской транспортной системы за счет поддержки принятия решений языковыми моделями.

Ландшафт как совокупность состояний, в которых может находиться модель морской транспортной системы, создаётся за счёт математического моделирования путей перехода между

гипотетическими состояниями системы. Моделирование экспертом путей перехода вырабатывается при анализе ситуаций и выработке решений. Ландшафт языковой модели определяет ее вид, – большая, открытая, отраслевая, с разным количеством параметров и не только.

Самые умные, огромные и дорогие в разработке языковые модели, так называемые проприетарные гиганты, принадлежат к конкретным технологическим задачам, их исходный код засекречен, а обычные пользователи получают к ним доступ через сайты, приложения или платные подписки. Например, OpenAI (GPT-4o, GPT-5) лучше других пишет код, логически мыслит и поддерживает диалог. Google (Gemini 1.5 Pro/Ultra), от главных конкурентов OpenAI отличает контекстное окно, использование которого позволяет анализировать большой объем заданной информации. Модели Anthropic (Claude) сделаны с упором на безопасность, этику и глубокую работу с текстом на английском языке.

К языковым моделям с открытым исходным кодом относят, например, DeepSeek. Это модели, код и «веса» которых создатели выложили в открытый доступ [15]. Языковые модели измеряются в параметрах, количество которых усложняет так называемые нейронные связи. Так ландшафт по «весовым категориям» в зависимости от количества параметров делит модели на большие от 100 миллиардов параметров, средние 7-70 и маленькие до 3 миллиардов параметров

Новейший тренд – это маленькие модели SLM (Small Language Models), которые могут работать на смартфоне или ноутбуке без интернета (например, семейство Microsoft Phi или Google Gemma) и ориентированы на решение небольших задач таких как редактирование писем или поиск ошибок [16].

Специализированные языковые модели

Раньше языковые модели пытались уметь всё сразу. Сегодня ландшафт сильно смещается в сторону узкой специализации. Появляются:

1. Модели-кодеры: Ориентированы исключительно на написание и проверку программного кода (например, CodeLlama).
2. Мультимодальные модели: Они не просто читают текст, но и «видят» картинки, графики, понимают аудио и могут генерировать голос в ответ.
3. Отраслевые модели: обучены строго на медицинских картах (для помощи врачам), на юридических законах или на научных статьях по лазерной физике и квантовым технологиям.

Отраслевые (или доменные) языковые модели – это ИИ-помощники, которые получили узкую высшую квалификацию. Если обычная ChatGPT – это эрудированный собеседник, то отраслевая модель – это дипломированный юрист, практикующий хирург или финансовый аналитик. Их обучают на закрытых профессиональных базах данных, поэтому они понимают сложный профессиональный и реже «выдумывают» факты, что важно там, где цена ошибки слишком высока.

Главный секрет успеха отраслевых моделей – эффективность. Небольшая отраслевая модель (например, на 7 или 13 миллиардах параметров), обученная строго на морских текстах, в своей узкой сфере решает задачи точнее, быстрее и дешевле, чем огромная универсальная модель на 100+ миллиардов параметров.

Алгоритм создания языковых моделей

Качество языковой модели в значительной степени обусловлено характеристиками используемого массива текстов: некорректные или нерепрезентативные данные неизбежно снижают эффективность итогового продукта. На подготовительном этапе осуществляется сбор текстовых материалов, включающих литературные произведения, научные и публицистические статьи, фрагменты программного кода, международные и государственные стандарты и специализированную документацию. Очистка набора данных заключается в освобождении массива от повторяющихся фрагментов, элементов гипертекстовой разметки, сведений, позволяющих идентифицировать личность, а также от нерелевантных включений.

Семантика языковой модели максимально проявляется на завершающем шаге предварительного этапа, результатом которого является сегментация текста на минимальные смысловые единицы токены. Выработка токенов, которых миллионы, идёт с применением специализированного программного инструмента – токенизатора.

Выбор стратегии разбиения на токены, – критически важный этап в подготовке данных для языковой модели, так как русские слова имеют изменяемые окончания и длинные основы, а словарь модели может содержать меньше готовых сочетаний.

Считается, что на предварительном этапе создания LLM моделей роль инженера по работе с данными ключевая. Инженеры по работе с данными осуществляют сбор, предобработку и систематизацию больших массивов текстовой информации, разрабатывают и поддерживают технологические цепочки обработки данных и управляют хранилищами информации. Квалификационные требования включают владение инструментами для работы с большими данными (Spark), языками программирования (Python) и средствами управления базами данных (SQL), а также опыт обработки неструктурированных текстовых массивов. Однако токенизация отраслевых небольших моделей имеет особенность не только в тонкой настройке обучения модели на завершающих этапах, но и в понимании предметной области на этапах сбора массива данных для обучения.

Проектирование архитектуры и предварительное обучение, как второй этап, предполагает вовлечение исследователей в области обработки естественного языка, которые отвечают за разработку архитектуры нейронной сети, выбор функций потерь и других критериев оценки качества обучения, мониторинг процесса обучения модели. Как правило, исследователи в области обработки естественного для безопасности морских транспортных систем языка и языковых моделей работают с программными платформами PyTorch, Hugging Face, Megatron-LM.

Второй этап характеризуется высокой ресурсоёмкостью и предполагает формирование базовых когнитивных способностей модели: она

осваивает закономерности языковой системы и общие представления о мире посредством прогнозирования последующего элемента в текстовой последовательности. Ключевым решением является выбор структурной организации нейросети. Одновременно определяется масштаб модели, выражаемый в количестве настраиваемых параметров (например, 3 миллиарда). Процесс обучения реализуется на вычислительном кластере, объединяющем значительное количество графических процессоров, и может продолжаться несколько недель. Итогом становится базовая версия модели, обладающая обширными знаниями, но не способная корректно реагировать на пользовательские инструкции. Адаптация к выполнению инструкций вырабатывается за счёт обучающего набора данных, структурированного по принципу «запрос – образцовый ответ». В ходе обучения система осваивает распознавание типовых формулировок заданий.

Заключительный этап направлен на тонкую настройку обучения модели. Обучение строится на анализе человеческих предпочтений: системе предъявляются альтернативные варианты ответов на один и тот же запрос, после чего эксперты или более развитая языковая модель определяют предпочтительный вариант. Дополнительно внедряются механизмы пошагового логического вывода, позволяющие повысить обоснованность рассуждений и минимизировать риски генерации потенциально опасных или некорректных ответов.

Финальная стадия предполагает адаптацию модели к условиям промышленного применения. Для снижения требований к вычислительным ресурсам применяется процедура преобразования числовых параметров модели к формату с меньшей разрядностью.

Ключевые роли участников проекта – это инженер информационной инфраструктуры, эксперт по валидации и отраслевые специалисты. Инженеры инфраструктуры и эксплуатации языковых моделей обеспечивают организацию распределённого обучения, упаковку программного решения в стандартизированные контейнеры и развёртывание интерфейса для доступа к функционалу модели. Требуется понимание принципов работы графических процессоров, распределённых вычислений и облачных сервисов [17,18,19].

Эксперты по валидации искусственного интеллекта и отраслевые специалисты формируют эталонные наборы ответов для этапа адаптации модели к выполнению инструкций, а также проводят экспертную оценку результатов на стадии согласования поведения. Фактором, обеспечивающим семантическую точность языковой модели, является наличие профессиональных знаний в конкретной предметной области безопасности морских транспортных, а не только ИТ-компетенций

Подходы к оценке семантической близости документов из базы знаний по безопасности морских транспортных систем

Подходы к оценке семантической близости документов, выявлению дублирования и противоречий в базах знаний и хранилищах данных хорошо описывают авторы [20]. Используя косинусную меру близости, векторную модель, коэффициент ранговой корреляции Спирмена, статическую меру можно добиться такой сингулярности, которая будет приемлема в семантике языка, понятного профессиональному судоводителю.

Расчет косинусного расстояния между векторами для определения силы связи в семантическом пространстве используется по причине высокой устойчивости косинусного расстояния к различным преобразованиям векторов [21].

$$\cos\varphi = \frac{\vec{a} \times \vec{b}}{|\vec{a}| \times |\vec{b}|}$$

В самом простом смысле разнесение слов по евклидову пространству происходит путём присвоения каждому слову определенных весов, например, «шторм» имеет координату 1,0,1 (рис.1).

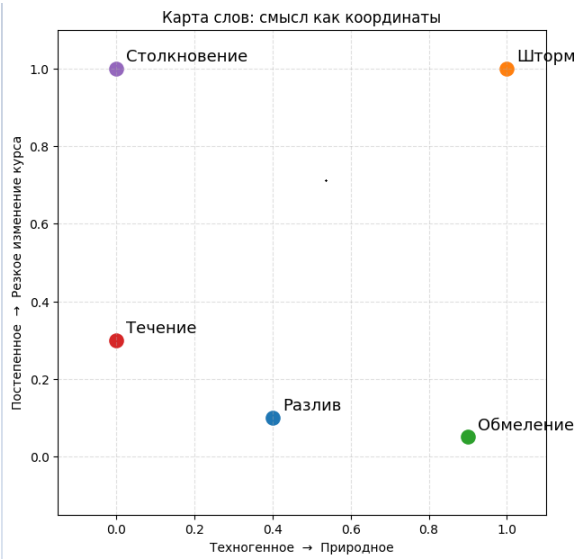


Рис. 1– Векторное представление семантики слов

Создание такой учебной модели в GoogleColab занимает всего 17 строчек кода, а обучение модели (рис. 2) отнимает не более 10 секунд.

Эмбеддинг (embedding) это векторное представление слова или токена, где каждое число отражает какую-то семантическую характеристику, когда похожие по смыслу слова оказываются близко друг к другу, так слово «шторм», например, может состоять из 300 векторов.

Данный пример является элементарным случаем смыслового представления слова (эмбеддинга) в виде векторов, которые собираются в матрицу для хранения и применения при обучении или использовании.

Авторы [20] предлагают автоматизировать сбор документов для базы знаний используя Латентно-семантический анализ. Латентно-семантический анализ (LSA) – это метод обработки естественного языка, который использует сингулярное разложение матриц слов для выявления скрытых латентных семантических связей. Существенным фактором, влияющим на точность выявления дублирования и противоречий в связи заданных слов при использовании метода LSA, является определение оптимального ранга аппроксимирующей матрицы.

Методология соблюдения семантики при создании набора данных к морским языковым моделям

Морская отрасль представляет собой уникальную сферу, требующую глубокого понимания технических, нормативных и эксплуатационных аспектов. Данная работа посвящена подготовке создания методологии сбора и обработки набора данных для тонкой настройки моделей ИИ в морской сфере.

Самым успешным проектом сегодня является [15], в котором методология создания набора данных состоит из двух этапов:

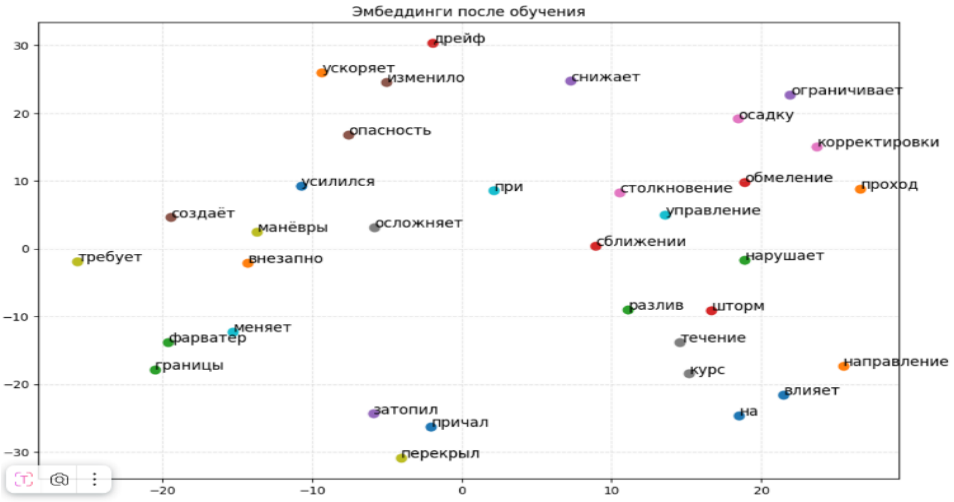


Рис. 2 – Изменение векторного представления семантики слов после обучения модели в GoogleColab

– генерация вопросов на основе структурированного подхода;

– формирование ответов с применением методологии анализа и синтеза.

На этапе генерации вопросов в источниках [15,22] использовался комплексный подход, включающий как синтез морских сценариев с применением GPT-4o так и интеграцию предметных знаний из специализированных документов. Внимание к видам вопросов, составляющих промт к обучающей модели ключевой элемент методологии. Так вопросы, составляющие структуру набора данных, или ландшафт языковой модели, разделена на три вида:

– концептуальные вопросы (4852 вопросов) – охватывают базовые морские концепции и принципы;

– математические задачи (6065 задач.) – включают навигационные и инженерные расчеты;

– операционные вопросы (45340 вопросов) – касаются стандартных процедур и нормативных требований.

Процесс генерации ответов осуществляется в два этапа, – аналитический и синтетический, созданная авторами [15,22] методология позволяет модели эффективно справляться как с базовыми теоретическими вопросами, так и со сложными многоэтапными задачами в реальных морских сценариях, что делает её ценным инструментом для морской отрасли.

Данный подход, как утверждают авторы [15,22], может быть масштабирован и адаптирован для еще более узких и специализированных областей безопасности морских транспортных систем, требующих глубокого предметного понимания и точности в решениях.

Заключение

Современный ландшафт разработок в области искусственного интеллекта убедительно демонстрирует, что подавляющее большинство успешных отраслевых решений (по оценкам, до 95% проектов) базируются не на создании моделей «с нуля», а на адаптации сильных открытых базовых архитектур через глубокую тонкую настройку на специализированные предметные области. Морские транспортные системы в этом смысле представляют собой сложную, но структурированную среду, располагающую уникальными массивами данных: от регламентов международных организаций и прецедентных разборов морских клубов до операционных документов – бортовых журналов, записей переговоров и отчётов о внештатных ситуациях. Однако наличие данных само по себе не обеспечивает качества работы интеллектуальной системы. Ключевым фактором становится архитектура обработки и глубокая семантическая настройка, начиная с уровня токенизации, где закладывается способность модели различать нюансы профессиональной морской терминологии.

Методологическая основа в этом контексте выступает не просто вспомогательным элементом, а каркасом, без которого любые действия с данными превращаются в интуитивные догадки. Она включает в себя как анализ отраслевых кейсов, позволяющий перенимать успешные практики и избегать типичных ошибок, так и оперативный мониторинг новых сценариев угроз и изменений в регулирующих требованиях – фактор, критически важный для динамичной среды морской безопасности.

Результатом такого комплексного подхода становится построение не просто очередной языковой модели, а модели семантического пространства знаний, интегрированной в систему поддержки принятия решений. На постобработке эта модель разворачивается в полноценную инфраструктуру знаний: семантические сети, онтологии и графы знаний (Knowledge Graph) – работа на перспективу. Именно такая семантическая карта, объединяющая нормативные, прецедентные и

операционные данные, превращает разрозненные сведения в систему взаимосвязанных сущностей и связей, обеспечивая качественно новый уровень осведомлённости и точности рекомендаций для обеспечения безопасности движения в морских транспортных системах.

Заключение, к которому приходят авторы, - семантика морских транспортных систем требует стандартизации набора данных для обучения языковых моделей.

Литература

1. Daniel Menges and Adil Rasheed. Digital twin for autonomous surface vessels: Enabler for safe maritime navigation. [Электронный ресурс]. – URL: https://arxiv.org/abs/2411.03465 (дата обращения: 21.07.2026).
2. Астреин В.В., Кондратьев С.И. О проблеме и задачах автоматического мониторинга в СППР безопасности судовождения // Эксплуатация морского транспорта. – 2022. – № 2(103). – С.148-153.
3. Скороходов Д.А. Борисова Л.Ф., Борисов З.Д. Принципы и категории обеспечения безопасности мореплавания // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2010. – Т. 13, № 4-1. – С.719-729.
4. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море (СОЛАС), 1974 г. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.imo.org/ru/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-(solas)%2C-1974.aspx (дата обращения: 21.07.2026).
5. Международные правила предупреждения столкновений судов в море, 1972. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.morkniga.ru/files/shipowner/1597931010_COLREG72.pdf (дата обращения: 21.07.2026).
6. STCW. International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers. [Электронный ресурс]. – URL: https://morpost.com/ru/sertifikat-stcw/ (дата обращения: 21.07.2026).
7. Международная конвенция по поиску и спасанию на море. [Электронный ресурс]. – URL: https://docs.cntd.ru/document/901824783 (дата обращения: 21.07.2026).
8. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.imo.org/ru/about/conventions/pages/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-(marpol).aspx (дата обращения: 21.07.2026).
9. Конвенция о контроле судовых балластных вод и осадков. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.imo.org/ru/about/conventions/pages/international-convention-for-the-control-and-management-of-ships%27-ballast-water-and-sediments-(bwm).aspx (дата обращения: 21.07.2026).
10. Конвенция о контроле вредных противообрастающих систем на судах. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-on-the-control-of-harmful-anti-fouling-systems-on-ships-(afs).aspx (дата обращения: 21.07.2026).
11. Конвенция по облегчению международного морского судоходства. [Электронный ресурс]. – URL: https://docs.cntd.ru/document/901898017 (дата обращения: 21.07.2026).
12. Конвенция о борьбе с незаконными актами, направленными против безопасности морского судоходства, направленная на борьбу с терроризмом и пиратством на море. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/sua-treaties.aspx (дата обращения: 21.07.2026).
13. Конвенция о гражданской ответственности за ущерб от загрязнения нефтью. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.imo.org/ru/about/conventions/pages/international-convention-on-civil-liability-for-oil-pollution-damage-(clc).aspx (дата обращения: 21.07.2026).
14. Афинская конвенция о перевозке морем пассажиров и их багажа. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=INT&n=15692#zg3q0QV0AhrE5Neo (дата обращения: 21.07.2026).
15. William Nguyen, An Phan, Konobu Kimura, Hitoshi Maeno, Mika Tanaka, Quynh Le, William Poucher, Christopher Nguyen Llamarine: Open-source Maritime Industry-specific Large Language Model. [Электронный ресурс]. – URL: https://arxiv.org/abs/2503.00203v1 (дата обращения: 25.07.2026).
16. Как устроены малые языковые модели: эффект масштаба. [Электронный ресурс]. – URL: https://trends.rbc.ru/trends/industry/668510909a7947e9acd8ffc3 (дата обращения: 01.07.2026).
17. Паламарчук Г.И., Бородина О.В., Иванова Н.В. Архитектура системы сбора данных с датчиков контроля поведения пассажира авиационного транспортно-логистического узла // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19, № 4. – С. 856-866.
18. Бородина О.В., Шаталова Н.В. Моделирование транспортных потоков в морских интеллектуальных транспортных системах // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 2-1(68). – С. 267-276.
19. Шаталова Н.В., Бородина О.В. Формирование моделей цифровой транспортной логистики на примере морских портов каспийского региона // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 3-1 (69). – С. 206-214.
20. Багрова И.А., Сытник Д.А. Кластеризация корпуса документов на русском языке на основе их представления в семантическом пространстве // Наука и бизнес: пути развития. – 2016. – № 12(66). – С. 129-134.
21. Краснов С.А., Илатовский А.С., Хомоненко А.Д., Арсеньев В.Н. Оценка семантической близости документов на основе латентно-семантического анализа с автоматическим выбором ранговых значений // Труды СПИИРАН. – 2017. – № 5(54). – С. 185-204.
22. SemiKong: Curating, Training, and Evaluating A Semiconductor Industry-Specific Large Language Model. [Электронный ресурс]. – URL: https://arxiv.org/abs/2411.13802 (дата обращения: 21.07.2026).

References

1. Daniel Menges and Adil Rasheed. Digital twin for autonomous surface vessels: Enabler for safe maritime navigation. [Elektronnyj resurs]. – URL: https://arxiv.org/abs/2411.03465 (data obrasheniya: 21.07.2026).
2. Astrein V.V., Kondratev S.I. O probleme i zadachah avtomaticheskogo monitoringa v sppr bezopasnosti sudovozhdeniya [On the problem and tasks of automatic monitoring in navigation safety distribution] // Ekspluataciya morskogo transporta. – 2022. – № 2(103). – S. 148-153.
3. Skorohodov D.A. Borisova L.F., Borisov Z.D. Principy i kategorii obespecheniya bezopasnosti moreplavaniya [Navigation safety principles and categories] // Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. – 2010. – T. 13, № 4-1. – S. 719-729.
4. Mezhdunarodnaya konvenciya po ohrane chelovecheskoj zhizni na more (SOLAS) [International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS)], 1974 g. [Elektronnyj resurs]. – URL: https://www.imo.org/ru/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-(solas)%2C-1974.aspx (data obrasheniya: 21.07.2026).
5. Mezhdunarodnye pravila preduprezhdeniya stolknovenij sudov v more International Rules for Preventing Collisions at Sea], 1972. [Elektronnyj resurs]. – URL: https://www.morkniga.ru/files/shipowner/1597931010_COLREG72.pdf (data obrasheniya: 21.07.2026).
6. STCW. International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers. [Elektronnyj resurs]. – URL: https://morpost.com/ru/sertifikat-stcw/ (data obrasheniya: 21.07.2026).
7. Mezhdunarodnaya konvenciya po poisku i spasaniyu na more [International Convention on Search and Rescue at Sea]. [Elektronnyj resurs]. – URL: https://docs.cntd.ru/document/901824783 (data obrasheniya: 21.07.2026).
8. Mezhdunarodnaya konvenciya po predotvrasheniyu zagryazneniya s sudov [International Convention for the Prevention of Pollution from Ships]. [Elektronnyj resurs]. – URL: https://www.imo.org/ru/about/conventions/pages/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-(marpol).aspx (data obrasheniya: 21.07.2026).
9. Konvenciya o kontrole sudovyh ballastnyh vod i osadkov [Convention on the Control of Marine Ballast Water and Sediments]. [Elektronnyj resurs]. – URL: https://www.imo.org/ru/about/conventions/pages/international-convention-for-the-control-and-management-of-ships%27-ballast-water-and-sediments-(bwm).aspx (data obrasheniya: 21.07.2026).
10. Konvenciya o kontrole vrednyh protivoobrastayushih sistem na sudah [Convention on the Control of Harmful Anti-fouling Systems on Ships]. [Elektronnyj resurs]. – URL: https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-on-the-control-of-harmful-anti-fouling-systems-on-ships-(afs).aspx (data obrasheniya: 21.07.2026).
11. Konvenciya po oblegcheniyu mezhdunarodnogo morskogo sudohodstva [Convention on the Facilitation of International Maritime Navigation]. [Elektronnyj resurs]. – URL: https://docs.cntd.ru/document/901898017 (data obrasheniya: 21.07.2026).
12. Konvenciya o borbe s nezakonnymi aktami, napravlennymi protiv bezopasnosti morskogo sudohodstva, napravlennaya na borbu s terrorizmom i piratstvom na more [Convention for the Suppression of Unlawful Acts against the Safety of Maritime Navigation, aimed at combating terrorism and piracy at sea]. [Elektronnyj resurs]. – URL: https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/sua-treaties.aspx (data obrasheniya: 21.07.2026).
13. Konvenciya o grazhdanskoj otvetstvennosti za usherb ot zagryazneniya neftyu [Convention on Civil Liability for Oil Pollution Damage]. [Elektronnyj resurs]. – URL: https://www.imo.org/ru/about/conventions/pages/international-convention-on-civil-liability-for-oil-pollution-damage-(clc).aspx (data obrasheniya: 21.07.2026).
14. Afinskaya konvenciya o perevozke morem passazhirov i ih bagazha [Athens Convention on the Carriage by Sea of Passengers and Their Baggage]. [Elektronnyj resurs]. – URL: https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=INT&n=15692#zg3q0QV0AhrE5Neo (data obrasheniya: 21.07.2026).
15. William Nguyen, An Phan, Konobu Kimura, Hitoshi Maeno, Mika Tanaka, Quynh Le, William Poucher, Christopher Nguyen Llamarine: Open-source Maritime Industry-specific Large Language Model. [Elektronnyj resurs]. – URL: https://arxiv.org/abs/2503.00203v1 (data obrasheniya: 25.07.2026).
16. Kak ustroeny malye yazykovye modeli: effekt masshtaba [How small language models work: economies of scale]. [Elektronnyj resurs]. – URL: https://trends.rbc.ru/trends/industry/668510909a7947e9acd8ffc3 (data obrasheniya: 01.07.2026).
17. Palamarchuk G.I., Borodina O.V., Ivanova N.V. Arhitektura sistemy sbora dannyh s datchikov kontrolya povedeniya passazhira aviacionnogo transportno-logisticheskogo uzla [Architecture of the system for collecting data from sensors for monitoring the behavior of a passenger of an aviation transport and logistics hub] // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobsheniya. – 2022. – T. 19, № 4. – S. 856-866.
18. Borodina O.V., Shatalova N.V. Modelirovanie transportnyh potokov v morskih intellektualnyh transportnyh sistemah [Simulation of traffic flows in marine intelligent transport systems] // Morskie intellektualnye tehnologii. – 2025. – № 2-1(68). – S. 267-276.
19. Shatalova N.V., Borodina O.V. Formirovanie modelej cifrovoj transportnoj logistiki na primere morskih portov kaspijskogo regiona [Formation of models of digital transport logistics on the example of seaports of the Caspian region] // Morskie intellektualnye tehnologii. – 2025. – № 3-1 (69). – S. 206-214.
20. Bagrova I.A., Sytnik D.A. Klasterizaciya korpusa dokumentov na russkom yazyke na osnove ih predstavleniya v semanticheskom prostranstve [Clustering of the corpus of documents in Russian based on their representation in the semantic space] // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2016. – № 12(66). – S. 129-134.

21. Krasnov S.A., Ilatovskij A.S., Homonenko A.D., Arsenev V.N. Ocenka semanticheskoj blizosti dokumentov na osnove latentno-semanticheskogo analiza s avtomaticheskim vyborom rangovyh znachenij [Evaluation of semantic proximity of documents based on latent semantic analysis with automatic selection of rank values] // Trudy SPIIRAN. – 2017. – № 5(54). – S. 185-204.
22. SemiKong: Curating, Training, and Evaluating A Semiconductor Industry-Specific Large Language Model. [Elektronnyj resurs]. – URL: https://arxiv.org/abs/2411.13802 (data obrasheniya: 21.07.2026).

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

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

Бородина Ольга Владимировна, старший 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, Senior 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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 05.08.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.08.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 12.08.2026.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Научная статья
УДК 656.6.058:614.841:504.06
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.054

Алгоритм оценки пожарной опасности морского судна как фактора классификации экологических рисков водного транспорта

Скороходов Д.А.[1] skorohodda@mail.ru, **Каминский В.Ю.**[1] Kaminskyvy@yandex.ru,
Королев О.А.[1] korolev@iptran.ru
[1]Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. В статье пожар на судне рассматривается как суперпозиция непрерывного случайного процесса изменения поражающих факторов и управляемого дискретного процесса борьбы с возгоранием. Введены понятия критических температур, определяющих моменты выхода из строя персонала, технических средств и корпусных конструкций. Построен граф состояний и переходов, сформирована система дифференциальных уравнений Колмогорова и получено её аналитическое решение для поглощающей марковской цепи методом интегрирования вероятностей состояний. Интенсивности переходов определяются на основе предположения о пуассоновском характере потока пожаров и нормальном распределении времени принятия решения и тушения с применением функции Лапласа. Предложен алгоритм интеграции оценки пожарной опасности в систему классификации экологических рисков водного транспорта, обеспечивающий переход от реактивного ликвидационного подхода к проактивному управлению экологическими последствиями.
Ключевые слова: пожарная опасность, морское судно, экологические риски, марковская модель, граф состояний, уравнения Колмогорова, функция Лапласа, классификация рисков.
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., Каминский В.Ю., Королев О.А. Алгоритм оценки пожарной опасности морского судна как фактора классификации экологических рисков водного транспорта, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 259—265. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.054

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.054

Algorithm for assessing the fire hazard of a marine vessel as a factor in the classification of environmental risks of waterborne transport

Dmitriy A. Skorokhodov[1] skorohodda@mail.ru, **Valery Yu. Kaminsky**[1] Kaminskyvy@yandex.ru,
Oleg A. Korolev[1] korolev@iptran.ru
[1]Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences

Abstract. In the article, a fire on a ship is considered as a superposition of a continuous random process of changing damaging factors and a controlled discrete process of fire control. The concepts of critical temperatures are introduced, which determine the moments of failure of personnel, technical equipment and hull structures. A graph of states and transitions is constructed, a system of Kolmogorov differential equations is formed, and its analytical solution for an absorbing Markov chain is obtained by integrating the probabilities of states. The intensity of transitions is determined based on the assumption of the Poisson nature of the fire flow and the normal distribution of decision-making and extinguishing time using the Laplace function. An algorithm for integrating fire hazard assessment into the system of classification of environmental risks of water transport is proposed, ensuring the transition from a reactive liquidation approach to proactive environmental impact management.
Keywords: fire hazard, marine vessel, environmental risks, Markov model, graph of states, Kolmogorov equations, Laplace function, risk classification.
Financial Support: the work was carried out as part of the implementation of the state assignment of the IPT RAS No. 075-00605-26-00 for 2026 and the planning period of 2027 and 2028 at the expense of subsidies 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 state assignment dated January 20, 2026 No. 075-03-2026-498).
For citation: Dmitriy A. Skorohodov, Valery Yu. Kaminsky, Oleg A. Korolev. Algorithm for assessing the fire hazard of a marine vessel as a factor in the classification of environmental risks of waterborne transport, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 259—265. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.054

© Скороходов Д.А., Каминский В.Ю., Королёв О.А. 2026

Введение

Обеспечение пожарной безопасности морского судна представляет собой комплексную научно-прикладную задачу, обусловленную не только риском выхода из строя технических средств, но и критической угрозой для жизни экипажа, сохранности грузов и устойчивости морской среды. Согласно международной статистике аварийности, пожар относится к числу наиболее деструктивных инцидентов на водном транспорте, приводя к масштабным экологическим последствиям, включая разливы нефтепродуктов и деградацию морских экосистем [1]. В связи с этим количественная оценка пожарной опасности становится важнейшим элементом системы управления экологическими рисками и требует перехода от нормативно-описательных регламентов к вероятностно-аналитическим моделям [2].

В отечественной и зарубежной литературе вопросам пожарной безопасности посвящен ряд исследований. В работах [3, 4] рассмотрены задачи передачи информации в судовых системах пожарной сигнализации, устойчивых к термическому воздействию. Проблемы автоматизации контроля и адаптивного мониторинга исследованы в [5], а информационные параметры идентификации возгораний представлены в [6]. Зарубежные исследования акцентируют внимание на моделировании структурной уязвимости судов [7] и вероятностном анализе сценариев с использованием цепей Маркова и методов Монте-Карло [8]. Вопросы интеллектуальной поддержки судового персонала в аварийных ситуациях затрагиваются в недавних публикациях [9, 10].

Вместе с тем, существующие подходы преимущественно ориентированы на обнаружение и сигнализацию. Математический аппарат, связывающий температурные пороги деградации функциональных элементов судна с вероятностью перехода аварийной ситуации в стадию экологического инцидента, сформирован недостаточно. Цель работы заключается в разработке алгоритма оценки пожарной опасности судна, интегрированного в систему классификации экологических рисков, с полным аналитическим обоснованием вероятностных переходов.

Математическая постановка задачи

Суперпозиция процессов и критические пороги

Формально пожар на судне может быть представлен как результат конкуренции двух стохастических процессов:

$$\Xi(t) = F(t) \oplus U(t), \qquad (1)$$

где $F(t)$ — непрерывный случайный процесс изменения поражающих факторов (температура, задымление, тепловое излучение); $U(t)$ — управляемый дискретный процесс борьбы с возгоранием; $\oplus$ — оператор суперпозиции, отражающий динамическое противодействие деструктивного и защитного контуров.

По мере развития пожара достигаются критические значения температур $T_{\text{кр},k}$, при которых происходит необратимое нарушение функций персонала и отказ оборудования, что создает положительную обратную связь, ускоряющую распространение огня [11].

Вводится система критических температурных порогов $T_{\text{кр},k}$ $\left(k = \overline{1,6}\right)$, определяющих качественные изменения состояния системы «судно–экипаж–груз».

Физико-техническая градация критических температур приведена в табл.1.

Таблица 1

Классификация критических температур при развитии пожара в отсеках морского судна

Индекс i	Критическая температура $T_{\text{кр},i}$, °C	Физический смысл и последствия
1	45–55	Предел физиологической устойчивости экипажа и пассажиров; начало теплового стресса
2	60–80	Термическая деструкция взрывоопасных жидкостей, газов и легковоспламеняющихся материалов
3	85–105	Отказ радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), нарушение работы систем навигации и связи
4	120–150	Деградация изоляции силовых и контрольных кабелей; риск коротких замыканий
5	180–220	Возгорание внутренней отделки, мебели и технологического оборудования помещений
6	250–300	Потеря несущей способности корпусных конструкций и критических ТС; риск потери остойчивости

Примечание. Указанные диапазоны носят интегральный характер. Для конкретных помещений судна (ходовая рубка, машинное отделение, грузовые трюмы, каюты) значения $T_{\text{кр},i}$ подлежат уточнению в ходе процедуры квантификации с учётом материалов конструкции, схемы вентиляции, типа перевозимого груза и наличия систем активной защиты [12].

Модель применима как для судов, находящихся в стационарном положении (стоянка в порту, якорная стоянка), так и для движущихся единиц. В последнем случае следует учитывать аэродинамическое воздействие ветра, изменение угла крена/дифферента и влияние инерционных сил на распространение пламени и дыма. Для каждого

отсека формируется индивидуальная карта критических параметров, что позволяет перейти от глобальной оценки к локализованному вероятностному анализу.

Обоснование пуассоновской модели

Поскольку пожары относятся к классу редких событий, их возникновение моделируется как пуассоновский поток, удовлетворяющий условиям ординарности и отсутствия последействия. Число пожаров N, возникающих за время t, подчиняется распределению:

$$P_N(t) = \frac{(\lambda_{12} t)^N}{N!} e^{-\lambda_{12} t}, \quad (2)$$

где λ_{12} — интенсивность потока возгораний.

Ключевым свойством данного потока является марковское свойство: вероятность перехода в следующее состояние зависит только от текущего состояния и не зависит от предыстории процесса.

Это позволяет описать эволюцию ситуации с помощью однородной цепи Маркова с непрерывным временем [13].

Вероятностная модель и аналитическое решение

Граф состояний и система уравнений Колмогорова

Эволюция ситуации формализуется в виде ориентированного графа с 14 вершинами. Граф (рис.1) обладает линейной структурой с ветвлением на каждом этапе температурного порога. Состояния $3,5,7,9,11,13$ являются поглощающими (инцидент локализован), тогда как состояние 14 моделирует сценарий критического развития с высокой вероятностью экологического ущерба (табл.2).

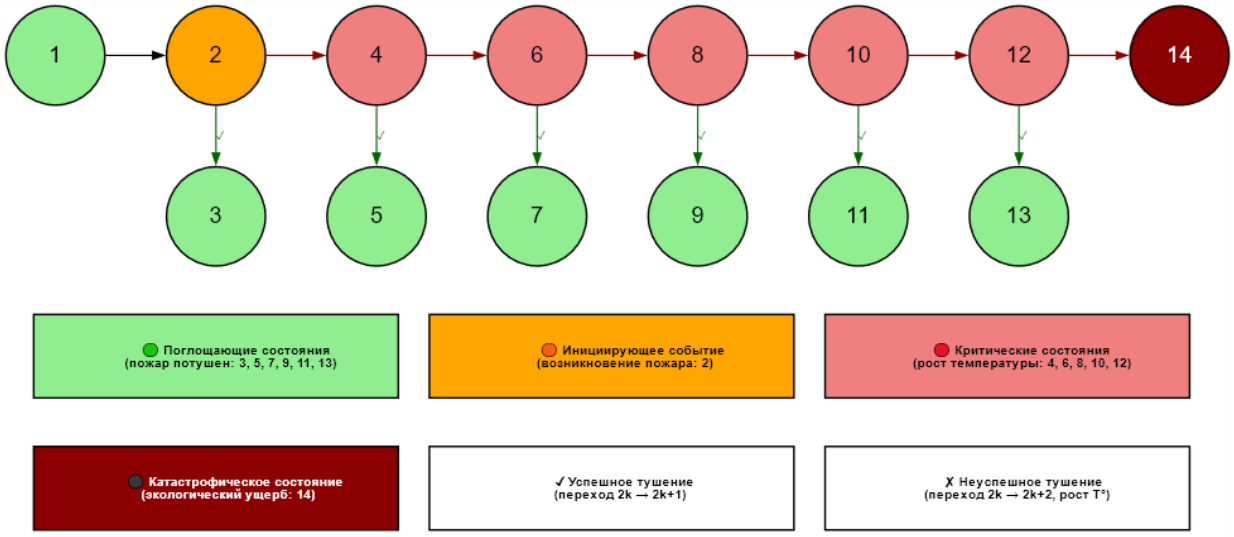


Рис.1. Граф состояния и переходов

Таблица 2

Интерпретация состояний марковской модели

Номер состояния S_i	Физическая интерпретация
1	Штатная эксплуатация (отсутствуют признаки возгорания)
2	Локализация очага пожара в помещении
3	Пожар ликвидирован до достижения $T_{кр,1}$
4	Пожар не ликвидирован; достигнут $T_{кр,1}$
5	Пожар ликвидирован до достижения $T_{кр,2}$
6	Пожар не ликвидирован; достигнут $T_{кр,2}$
7	Пожар ликвидирован до достижения $T_{кр,3}$
8	Пожар не ликвидирован; достигнут $T_{кр,3}$
9	Пожар ликвидирован до достижения $T_{кр,4}$
10	Пожар не ликвидирован; достигнут $T_{кр,4}$
11	Пожар ликвидирован до достижения $T_{кр,5}$
12	Пожар не ликвидирован; достигнут $T_{кр,5}$
13	Пожар ликвидирован до достижения $T_{кр,6}$
14	Пожар не ликвидирован; достигнут $T_{кр,6}$ (катастрофическое развитие)

Динамика вероятностей $P_i(t)$ нахождения системы в состоянии i описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова–Чепмена:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -\lambda_{12}P_1(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{12}P_1(t) - (\lambda_{23}+\lambda_{24})P_2(t), \\ \frac{dP_{2k+1}(t)}{dt} = \lambda_{2k,2k+1}P_{2k}(t), \quad k=\overline{1,6}, \\ \frac{dP_{2k+2}(t)}{dt} = \lambda_{2k,2k+2}P_{2k}(t) - \left(\lambda_{2k+2,2k+3}+\lambda_{2k+2,2k+4}\right)P_{2k+2}(t), \quad k=\overline{1,5}, \\ \frac{dP_{14}(t)}{dt} = \lambda_{12,14}P_{12}(t). \end{cases} \tag{3}$$

Начальные условия соответствуют штатной эксплуатации: $P_1(0)=1$, $P_i(0)=0$ при $i\neq 1$.

Метод интегрирования для поглощающих цепей

Поскольку состояния $2k+1$ и 14 являются поглощающими, при $t\to\infty$ вероятности нахождения в транзитных состояниях стремятся к нулю: $\lim\limits_{t\to\infty}P_i(t)=0$ для $i\in\{2,4,6,8,10,12\}$. Классическое «стационарное решение» в виде ненулевых предельных вероятностей для транзитных узлов не существует. Для задач классификации рисков представляет интерес вычисление предельных вероятностей поглощения Π_j. С этой целью вводится математическое ожидание времени пребывания в транзитном состоянии i:

$$\tau_i = \int_0^\infty P_i(t)\,dt. \tag{4}$$

Интегрируя систему (3) на интервале $[0;\infty)$ и учитывая, что $\int_0^\infty \frac{dP_i}{dt}dt = P_i(\infty)-P_i(0)$, получаем систему линейных алгебраических уравнений относительно τ_i:

$$\begin{cases} -\lambda_{12}\tau_1 + 1 = 0, \\ \lambda_{12}\tau_1 - (\lambda_{23}+\lambda_{24})\tau_2 = 0, \\ \lambda_{2k,2k+2}\tau_{2k} - \left(\lambda_{2k+2,2k+3}+\lambda_{2k+2,2k+4}\right)\tau_{2k+2} = 0, \quad k=\overline{1,5}. \end{cases} \tag{5}$$

Предельные вероятности реализации соответствующих сценариев вычисляются как поток вероятности в поглощающие состояния:

$$\Pi_{2k+1} = \lambda_{2k,2k+1}\tau_{2k}, \quad \Pi_{14} = \lambda_{12,14}\tau_{12}, \quad k=\overline{1,6}. \tag{6}$$

Аналитические выражения (5)–(6) позволяют вычислить вероятности исходов без ресурсоёмкого численного интегрирования, что обеспечивает оперативность алгоритма для практического применения в системах поддержки принятия решений [14].

Параметризация интенсивностей переходов

Суммарное время ликвидации пожара на k-м этапе моделируется как случайная величина, подчиняющаяся нормальному закону распределения:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \tag{7}$$

где параметры оцениваются по выборке из n реализаций или экспертным данным:

$$\mu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^n t_i\,, \quad \sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^n (t_i-\mu)^2. \tag{8}$$

Вероятность тушения пожара до достижения критической температуры $T_{\text{кр},k}$ (что соответствует пороговому времени $t_{\text{кр},k}$) вычисляется через нормированную функцию Лапласа $\Phi_0(x)$:

$$P\left(t < t_{\text{кр},k}\right) = \Phi_0\left(\frac{t_{\text{кр},k}-\mu}{\sigma}\right) + 0.5. \tag{9}$$

Интенсивности переходов из транзитных состояний $2k$ определяются пропорционально вероятностям успеха и неудачи, что отражает физический смысл ветвления потока вероятности:

$$\lambda_{2k,2k+1} = \lambda_{\Sigma,k}\left[\Phi_0\left(\frac{t_{\text{кр},k}-\mu}{\sigma}\right)+0.5\right], \tag{10}$$

$$\lambda_{2k,2k+2} = \lambda_{\Sigma,k}\left[0.5-\Phi_0\left(\frac{t_{\text{кр},k}-\mu}{\sigma}\right)\right], \tag{11}$$

где $\lambda_{\Sigma,k}$ — суммарная интенсивность попыток тушения на k-м этапе. Данный подход обеспечивает согласованность непрерывных временных характеристик процесса тушения с дискретной топологией марковского графа [15].

Алгоритм классификации экологических рисков

Полученные предельные вероятности Π_i служат количественной основой для классификации экологических рисков. Вероятность катастрофического развития Π_{14} интегрируется в матрицу рисков в соответствии с Руководством IMO по формальной оценке безопасности (FSA) [16] и требованиями конвенций MARPOL и SOLAS.

На основе стандарта ISO 31000 и подходов к количественной оценке экологической безопасности предлагается следующее ранжирование инцидентов:

1. Локальная угроза (сумма $\Pi_3+\Pi_5+\Pi_7>0.95$): последствия ограничены внутренними помещениями судна, экологический ущерб отсутствует или минимален. Требуется стандартная процедура отчётности.
2. Региональный инцидент (нарастание вероятностей Π_9,Π_{11},Π_{13}): частичная потеря герметичности, риск локального загрязнения акватории порта или прибрежной зоны. Необходимо привлечение береговых аварийно-спасательных формирований.
3. Трансграничная катастрофа ($\Pi_{14}>\Pi_{\text{доп}}$): потеря остойчивости и герметичности топливных танков, массированный выброс токсичных веществ и нефтепродуктов в морскую среду. Требуется активация международных протоколов ликвидации разливов и экологического мониторинга.

Данный алгоритм обеспечивает проактивное ранжирование маршрутов перевозки опасных грузов, оптимизацию регламентов технического обслуживания систем пожарной защиты и обоснование страховых премий на основе количественных метрик риска. Ограничением модели является предположение о постоянстве интенсивностей λ_{ij} на каждом этапе; в перспективе планируется интеграция с цифровыми двойниками судов и адаптация алгоритмов к потоку данных в реальном времени от IoT-датчиков и систем компьютерного зрения.

Заключение

В ходе исследования разработан алгоритм оценки пожарной опасности морского судна, интегрированный в систему классификации

экологических рисков. Пожар формализован как суперпозиция непрерывного процесса изменения поражающих факторов и дискретного процесса борьбы с возгоранием. Введена система критических температурных порогов, позволяющая перейти к количественной параметризации аварийной обстановки. Обоснована применимость марковского подхода. Сформирована система уравнений Колмогорова и получено её строгое аналитическое решение для поглощающей цепи через математические ожидания времён пребывания, обеспечивающее расчёт предельных вероятностей исходов. Разработана методика параметризации модели на основе нормального закона распределения времени ликвидации пожара и функции Лапласа. Установлена прямая количественная связь между вероятностными оценками пожарной опасности и классами экологического риска. Алгоритм согласуется с требованиями международных конвенций и стандартов управления рисками. Его внедрение позволит перейти к научно обоснованной, превентивной экологической политике в сфере водного транспорта.

Литература

1. Ventikos N. P., Psaraftis H. N., Stavroulakis G. Probabilistic modeling of ship fire scenarios using Markov chains and Monte Carlo simulation // Reliability Engineering & System Safety. 2020. Vol. 204. 107142.
2. 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.
3. Круглеевский В. Н., Суслов Д. В., Скороходов Д. А. Передача информации в судовых системах пожарной сигнализации // Морской вестник. 2012. № 2 (42). С. 53–56.
4. Абрамсов О. Ю., Москалец Д. О., Москалец О. Д., Скороходов Д. А. Полый электромагнитный волновод трёхсантиметрового диапазона как огнестойкая линия связи // Техника радиосвязи. 2017. Вып. 4 (35). С. 57–66.
5. Круглеевский В. Н., Скороходов Д. А. Методы адаптивного контроля пожарной опасности в помещениях морских транспортных средств // Транспорт России: проблемы и перспективы-2017: материалы междунар. науч.-практ. конф. СПб.: ИПТ РАН, 2018. С. 112–118.
6. Бацагин С. В., Скороходов Д. А., Стариченков А. Л. Общие информационные параметры пожарной опасности на транспортных средствах // Морские интеллектуальные технологии. 2011. № 2-1. С. 30–37.
7. Park D.-K., Shin Y.-H., Chung J.-H., Jung E. S. Development of damage control training scenarios of naval ships based on simplified vulnerability analysis results // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2016. Vol. 8, Issue 4. Pp. 386–397.
8. Goerlandt F., Montewka J. A probabilistic model for assessing maritime collision risk // Ocean Engineering. 2015. Vol. 104. Pp. 285–298.
9. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А. Алгоритмы и продукции для интеллектуальной поддержки судового персонала при пожаре // Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 3-1 (69). С. 139–149.
10. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А. Формализация задач интеллектуальных систем поддержки принятия решений в сложных аварийных ситуациях судна // Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 1-1 (67). С. 205–214.
11. Скороходов Д. А., Малыгин И. Г., Каминский В. Ю. Анализ обеспечения функциональной безопасности морского транспорта с учётом экологических аспектов // Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1-1 (71). С. 221–229.
12. Пожарная безопасность транспортно-перегрузочных комплексов угля, сжиженных углеводородных газов и нефтепродуктов в морском порту / Д. Ф. Кожевин, А. С. Поляков, А. А. Таранцев, В. Ю. Каминский // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4-1 (50). С. 193–200.
13. Карпенко А. П., Смирнов В. В. Стохастическое моделирование технических систем: учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. 312 с.
14. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А. Принципы организации информационного взаимодействия в системе интеллектуальной поддержки при ликвидации пожаров на судне // Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4-1 (70). С. 302–308.
15. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А. Оптимизация экологического взаимодействия судна и окружающей среды на основе математического моделирования в рамках дифференциальных квадратичных форм // Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4-1 (70). С. 294–301.
16. Formal Safety Assessment (FSA): Руководство по формальной оценке безопасности для использования в процессе принятия правил ИМО: MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2 / Международная морская организация (ИМО). [Место издания не указано]: ИМО, 2002 (с последующими поправками). Текст: электронный.

References

1. Ventikos N. P., Psaraftis H. N., Stavroulakis G. Probabilistic modeling of ship fire scenarios using Markov chains and Monte Carlo simulation // Reliability Engineering & System Safety. 2020. Vol. 204. 107142.
2. Kaminsky V. Yu., Skorokhodov D. A. Optimizatsiya sistemnykh matematicheskikh modeley ekologicheskogo vzaimodeystviya morskogo transporta i okruzhayushchey sredy [Optimization of system mathematical models of environmental interaction between maritime transport and the environment] // Marine Intelligent Technologies. 2025. No. 1-1 (67). Pp. 196–204.
3. Krugleyevskiy V. N., Suslov D. V., Skorokhodov D. A. Peredacha informatsii v sudovykh sistemakh pozharnoy signalizatsii [Information Transmission in Shipborne Fire Alarm Systems] // Maritime Herald. 2012. No. 2 (42). Pp. 53–56.

4. Abramsov O. Yu., Moskalets D. O., Moskalets O. D., Skorokhodov D. A. Polyy elektromagnitnyy volnovod tryokhsantimetrovogo diapazona kak ognestoykaya liniya svyazi [Hollow Electromagnetic Waveguide of Three-Centimeter Range as Fire-Resistant Communication Line] // Radio Communication Equipment. 2017. Iss. 4 (35). Pp. 57–66.
5. Krugleyevskiy V. N., Skorokhodov D. A. Metody adaptivnogo kontrolya pozharnoy opasnosti v pomeshcheniyakh morskikh transportnykh sredstv [Methods of Adaptive Fire Hazard Control in Compartments of Marine Vehicles] // Transport of Russia: Problems and Prospects-2017: Proc. Int. Sci.-Pract. Conf. St. Petersburg: Institute for Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 2018. Pp. 112–118.
6. Batsagin S. V., Skorokhodov D. A., Starichenkov A. L. Obshchie informatsionnye parametry pozharnoy opasnosti na transportnykh sredstvakh [General Information Parameters of Fire Hazard on Vehicles] // Marine Intelligent Technologies. 2011. No. 2-1. Pp. 30–37.
7. Park D.-K., Shin Y.-H., Chung J.-H., Jung E. S. Development of damage control training scenarios of naval ships based on simplified vulnerability analysis results // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2016. Vol. 8, Issue 4. Pp. 386–397.
8. Goerlandt F., Montewka J. A probabilistic model for assessing maritime collision risk // Ocean Engineering. 2015. Vol. 104. Pp. 285–298.
9. Kaminsky V. Yu., Skorokhodov D. A. Algoritmy i produktsii dlya intellektual'noy podderzhki sudovogo personala pri pozhare [Algorithms and Productions for Intelligent Support of Ship Personnel during Fire] // Marine Intelligent Technologies. 2025. No. 3-1 (69). Pp. 139–149.
10. Kaminsky V. Yu., Skorokhodov D. A. Formalizatsiya zadach intellektual'nykh sistem podderzhki prinyatiya resheniy v slozhnykh avariynykh situatsiyakh sudna [Formalization of Tasks for Intelligent Decision Support Systems in Complex Ship Emergency Situations] // Marine Intelligent Technologies. 2025. No. 1-1 (67). Pp. 205–214.
11. Skorokhodov D. A., Malygin I. G., Kaminsky V. Yu. Analiz obespecheniya funktsional'noy bezopasnosti morskogo transporta s uchyotom ekologicheskikh aspektov [Analysis of Functional Safety of Marine Transport Considering Environmental Aspects] // Marine Intelligent Technologies. 2026. No. 1-1 (71). Pp. 221–229.
12. Kozhevin D. F., Polyakov A. S., Tarantsev A. A., Kaminsky V. Yu. Pozharnaya bezopasnost' transportno-peregruzochnykh kompleksov uglya, szhizhennykh uglevodorodnykh gazov i nefteproduktov v morskom portu [Fire Safety of Coal, LNG and Oil Products Transshipment Complexes in Seaport] // Marine Intelligent Technologies. 2020. No. 4-1 (50). Pp. 193–200.
13. Karpenko A. P., Smirnov V. V. Stokhasticheskoe modelirovanie tekhnicheskikh sistem: uchebnoe posobie [Stochastic Modeling of Technical Systems: Textbook]. Moscow: Bauman MSTU Press, 2019. 312 p.
14. Kaminsky V. Yu., Skorokhodov D. A. Printsipy organizatsii informatsionnogo vzaimodeystviya v sisteme intellektual'noy podderzhki pri likvidatsii pozharov na sudne [Principles of Information Interaction Organization in Intelligent Support System for Ship Fire Fighting] // Marine Intelligent Technologies. 2025. No. 4-1 (70). Pp. 302–308.
15. Kaminsky V. Yu., Skorokhodov D. A. Optimizatsiya ekologicheskogo vzaimodeystviya sudna i okruzhayushchey sredy na osnove matematicheskogo modelirovaniya v ramkakh differentsial'nykh kvadratichnykh form [Optimization of Environmental Interaction between Ship and Environment Based on Mathematical Modeling] // Marine Intelligent Technologies. 2025. No. 4-1 (70). Pp. 294–301.
16. Formal Safety Assessment (FSA): Rukovodstvo po formal'noy otsenke bezopasnosti dlya ispol'zovaniya v protsesse prinyatiya pravil IMO [Formal Safety Assessment: Guidelines for use in the IMO rule-making process]: MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2 / International Maritime Organization (IMO). [S. l.]: IMO, 2002 (with subsequent amendments). Text: electronic.

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

Скороходов 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 им. 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

Королев Олег Александрович, кандидат технических наук, ученый секретарь, 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 05.07.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.07.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 30.07.2026.

Научная статья
УДК 658.3.07
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.055

Алгоритм интеллектуальной оценки эффективности профессионально-ценностных действий назначенного лица по обеспечению экологической безопасности судна в системе классификации экологических проблем

Скороходов Д.А.[1] skorohodda@mail.ru, **Каминский В.Ю.**[1] Kaminskyvy@yandex.ru,
Маринов М.Л.[1] marinlomsky@gmail.com
[1]Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. В статье выполнен анализ требований Международного кодекса по управлению безопасностью (МКУБ), позволивший структурировать иерархию целей и задач, возлагаемых на назначенное лицо (НЛ). Полученная структура послужила основой для разработки методики оценки эффективности профессиональной деятельности НЛ в системе управления безопасностью (СУБ) судна. Обоснована возможность формирования интегрального показателя результативности НЛ с использованием аппарата функций полезности и алгоритма расчета весовых коэффициентов значимости отдельных целей. Проведена математическая формализация когнитивно-волевых аспектов и профессиональной мотивации НЛ, структурированных по семи ключевым компонентам. Для их количественной оценки применена функция желательности Харрингтона и выведены соответствующие аналитические зависимости. Предложена модель оценки профессиональных компетенций НЛ, базирующаяся на показателях уровня владения нормативно-технической документацией по безопасной эксплуатации флота, и сформулирован обобщенный критерий качества его функционирования в СУБ. Особое внимание уделено роли НЛ как системообразующего элемента в процессе классификации экологических рисков водного транспорта. Показано, что надлежащее исполнение НЛ профессиональных функций обеспечивает достоверную идентификацию экологических инцидентов, их градацию по пространственному масштабу и фазе развития, что выступает необходимым условием для выработки адекватных мер реагирования и минимизации ущерба окружающей среде.
Ключевые слова: безопасность, коэффициент важности, назначенное лицо, структуризация, функция полезности, эффективность, экологические проблемы, классификация.
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., Каминский В.Ю., Маринов М.Л. Алгоритм интеллектуальной оценки эффективности профессионально-ценностных действий назначенного лица по обеспечению экологической безопасности судна в системе классификации экологических проблем, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 266—274. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.055

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.055

Algorithm for the Intelligent assessment of the effectiveness of the designated person's professional-value actions in ensuring vessel environmental safety within the environmental problem classification system

Dmitriy A. Skorokhodov[1] skorohodda@mail.ru, **Valery Yu. Kaminsky**[1] Kaminskyvy@yandex.ru,
Marin L. Marinov[1] marinlomsky@gmail.com,
[1]Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences

Abstract. The article presents an analysis of the requirements of the International Safety Management (ISM) Code, which made it possible to decompose the hierarchy of goals and objectives assigned to the Designated Person (DP). The resulting structure served as the basis for developing a methodology for assessing the effectiveness of the DP's professional activities within the vessel's Safety Management System (SMS). The feasibility of forming an integral performance indicator for the DP is substantiated using the apparatus of utility functions and an algorithm for calculating the weight coefficients of the significance of individual goals. A mathematical formalization of the cognitive-volitional aspects and professional motivation of the DP, structured into seven key components, has been carried out. Harrington's desirability function has been applied for their quantitative assessment, and the corresponding analytical relationships have been derived. A model for assessing the professional competencies of the DP is proposed, based on the indicators of the level of mastery of regulatory and technical documentation for the safe operation of the fleet, and a generalized criterion for the quality of their functioning within the SMS is formulated. Special attention is paid to the role of the DP as a system-forming element in the process of classifying environmental risks of water transport. It is shown that the proper performance of professional functions by the DP ensures the reliable identification of environmental incidents, their gradation by spatial scale and phase of development, which is a necessary condition for developing adequate response measures and minimizing environmental damage.

© Скороходов Д.А., Каминский В.Ю., Маринов М.Л. 2026

Keywords: safety, importance coefficient, designated person, structuring, utility function, efficiency, environmental problems, classification.
Financial Support: the work was carried out as part of the implementation of the state assignment of the IPT RAS No. 075-00605-26-00 for 2026 and the planning period of 2027 and 2028 at the expense of subsidies 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 state assignment dated January 20, 2026 No. 075-03-2026-498).
For citation: Dmitriy A. Skorohodov, Valery Yu. Kaminsky, Marin L. Marinov, Algorithm for the Intelligent assessment of the effectiveness of the designated person's professional-value actions in ensuring vessel environmental safety within the environmental problem classification system, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 266—274. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.055

Введение

Обеспечение экологической безопасности судоходства в условиях ужесточения международных стандартов требует перехода к проактивному управлению рисками. Ретроспективный анализ инцидентов подтверждает, что антропогенный фактор остается доминирующей причиной загрязнения морских акваторий [1, 2]. Для минимизации данных рисков Международной морской организацией (ИМО) внедрен Международный кодекс по управлению безопасностью (МКУБ), предписывающий функционирование Системы управления безопасностью (СУБ) [3]. Ключевым береговым элементом СУБ является назначенное лицо (НЛ), обеспечивающее мониторинг судовых операций, предотвращение инцидентов и связь с судоходной компанией.

Несмотря на нормативную регламентацию статуса НЛ, существующие подходы к оценке его деятельности носят преимущественно аудиторский характер, ограничиваясь проверкой формального соответствия документации без учета эффективности действий в условиях неопределенности [4–6]. Хотя в литературе развиты методы количественной оценки экологических рисков [7–10] и заложены основы учета профессионально-ценностных качеств экипажа [11–14], комплексный математический аппарат для оценки НЛ остается неразработанным. Отсутствуют модели, интегрирующие иерархию целей МКУБ, когнитивно-волевые детерминанты, уровень нормативной подготовки и их влияние на классификацию экологических инцидентов.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью формализации критериев эффективности НЛ в привязке к системе классификации экологических угроз. Качественное исполнение функций НЛ гарантирует достоверную идентификацию рисков, их градацию по масштабу (локальный, региональный, трансграничный) и фазе развития, что критически важно для превентивного реагирования. Цель работы — разработка алгоритма количественной оценки профессионально-ценностных компетенций НЛ для обеспечения экологической безопасности судна в контексте градации экологических рисков.

Декомпозиция целей и подцелей профессиональной деятельности назначенного лица. Методология расчёта коэффициентов важности

Иерархическая структура целей и подцелей в рамках МКУБ

Основой для формализации методики оценки эффективности назначенного лица (НЛ) выступает структурная декомпозиция требований Международного кодекса по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращением загрязнения (МКУБ). Анализ нормативного документа позволил выделить восемь ключевых целей ($Ц_i$), определяющих функциональный профиль НЛ в системе управления безопасностью (СУБ) судоходной компании и судна

Таблица 1

Функциональный профиль назначаемого лица

Код цели	Формулировка цели
$Ц_1$	Разработка политики в области безопасности и защиты окружающей среды
$Ц_2$	Обеспечение наличия и актуальности основных документов СУБ
$Ц_3$	Планирование судовых операций с учётом факторов безопасности
$Ц_4$	Разработка процедур готовности к аварийным ситуациям
$Ц_5$	Организация учёта, расследования и анализа несоответствий и происшествий
$Ц_6$	Контроль технического обслуживания и ремонта судна и оборудования
$Ц_7$	Управление документооборотом СУБ
$Ц_8$	Проведение внутренних проверок, пересмотра и оценки эффективности СУБ

Каждая цель детализируется совокупностью подцелей ($ПЦ_{ij}$), характеризующих конкретные процедуры и операционные задачи. В общей сложности выделена 71 подцель, формирующая исчерпывающий перечень требований к НЛ. Например, цель $Ц_1$ включает 6 подцелей, охватывающих разработку политик безопасной эксплуатации, экологической безопасности, управления рисками, совершенствования компетенций экипажа и готовности к чрезвычайным

ситуациям. Цель $Ц_2$ структурирована через 19 подцелей, обеспечивающих документальное подтверждение полномочий, ресурсного обеспечения, квалификационных требований и процедур коммуникации между береговой службой и судном. Полная иерархия целей и подцелей служит структурным каркасом для последующей количественной оценки профессионально-ценностных действий НЛ.

Математическая модель интегрального показателя качества НЛ

Интегральный показатель профессионально-ценностного качества назначенного лица ($K_{НЛ}$) рассчитывается как взвешенная сумма технических полезностей всех выделенных целей:

$$K_{НЛ} = \sum_{i=1}^{8} \alpha_i \cdot V(Ц_i), \quad (1)$$

где $V(Ц_i)$ – нормированная функция полезности (техническая эффективность) достижения i-й цели, принимающая значения в диапазоне $[0; 1]$; α_i – нормированный коэффициент важности i-й цели, определяемый методом экспертного парного сравнения.

В качестве критерия эффективности используется принцип максимизации технической полезности, что позволяет автоматически привести разнородные цели к единой безразмерной шкале и формализовать процесс оценки. Для большинства процедурных подцелей целесообразно применять дискретную релейную функцию полезности ($V = 0$ – неудовлетворительно, $V = 1$ – удовлетворительно) либо непрерывную функцию желательности Харрингтона, обеспечивающую плавную градацию качества выполнения задач в условиях неопределённости и динамичной операционной среды.

Методика расчёта коэффициентов важности целей

Весовые коэффициенты α_i определяются на основе матрицы парных сравнений, заполняемой экспертами в области морской безопасности, экологического менеджмента и управления рисками. Используется трёхбалльная шкала предпочтений: 2 – доминирование, 1 – подчинение, 0 – равнозначность. Результаты сравнения сведены в табл. 2.

Таблица 2

Матрица парного сравнения и расчёт коэффициентов важности целей

Цель $Ц_i$	$Ц_1$	$Ц_2$	$Ц_3$	$Ц_4$	$Ц_5$	$Ц_6$	$Ц_7$	$Ц_8$	Абсолютный вес $\sum a_{ij}$	Относительный вес α_i
$Ц_1$	0	2	1	1	2	2	0	0	8	0,113
$Ц_2$	1	0	1	1	1	1	0	0	5	0,070
$Ц_3$	2	2	0	0	2	2	2	2	12	0,169
$Ц_4$	2	2	0	0	2	1	2	2	11	0,155
$Ц_5$	1	2	1	1	0	1	1	1	8	0,113
$Ц_6$	2	2	2	2	2	0	2	2	14	0,197
$Ц_7$	0	0	1	1	2	1	0	2	7	0,099
$Ц_8$	0	0	1	1	2	1	1	0	6	0,085
Итого									**71**	**1,000**

Примечание. Относительные веса рассчитываются по формуле:

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^{8} a_{ij}}{\sum_{i=1}^{8}\sum_{j=1}^{8} a_{ij}}, \quad (2)$$

где a_{ij} – элемент матрицы парных сравнений, отражающий относительную значимость i-й цели по отношению к j-й.

С учётом полученных коэффициентов важности выражение (1) принимает развернутый аналитический вид:

$$K_{НЛ} = 0{,}113 \cdot V(Ц_1) + 0{,}070 \cdot V(Ц_2) + 0{,}169 \cdot V(Ц_3) + 0{,}155 \cdot V(Ц_4) + \\ + 0{,}113 \cdot V(Ц_5) + 0{,}197 \cdot V(Ц_6) + 0{,}099 \cdot V(Ц_7) + 0{,}085 \cdot V(Ц_8). \quad (3)$$

Максимальный вес ($\alpha_6 = 0{,}197$) присвоен цели $Ц_6$ (контроль технического обслуживания и ремонта), что объективно отражает её критическую роль в предотвращении экологических инцидентов, связанных с отказами оборудования, разливами нефтепродуктов и выбросами загрязняющих веществ. Наименьший вес имеет цель $Ц_2$ ($\alpha_2 = 0{,}070$), что обусловлено её преимущественно административно-документальным характером при отсутствии прямого воздействия на текущую экологическую обстановку. Полученная модель обеспечивает строгую количественную основу для последующей интеграции когнитивно-волевых детерминант и профессионального интереса НЛ.

Структуризация когнитивно-волевых детерминант профессиональной пригодности

Помимо процедурного соответствия требованиям Международного кодекса по управлению безопасностью (МКУБ), эффективность назначенного лица (НЛ) в значительной степени определяется его когнитивно-волевыми качествами, уровнем профессиональной ответственности и мотивационно-ценностными установками. В рамках предложенной модели данные детерминанты структурированы по семи ключевым компонентам, каждый из которых формализуется через систему количественно оцениваемых субпоказателей.

1. **Превентивные действия** (PO_1) – способность к упреждающему анализу рисков. Включает: когнитивный анализ состояния оборудования и персонала ($PO_{1.1}$–$PO_{1.2}$),

идентификацию внутренних технических и человеческих рисков ($PO_{1.3}$–$PO_{1.4}$), оценку внешних факторов, влияющих на оборудование и управленческие решения ($PO_{1.5}$–$PO_{1.6}$).

2. **Формирование резервов (**PO_2**)** – обеспечение ресурсной устойчивости: материально-техническое ($PO_{2.1}$), техническое/модульное ($PO_{2.2}$) и финансовое ($PO_{2.3}$) резервирование.

3. **Управление рисками (**PO_3**)** – идентификация допустимого уровня риска ($PO_{3.1}$) и реализация управленческих решений в условиях информационной неопределённости ($PO_{3.2}$).

4. **Готовность к чрезвычайным ситуациям (**PO_4**)** – анализ сценариев ЧС ($PO_{4.1}$), оперативное реагирование ($PO_{4.2}$) и ликвидация последствий ($PO_{4.3}$).

5. **Дисциплинарная ответственность (**PO_5**)** – соблюдение нормативных ($PO_{5.1}$), профессиональных ($PO_{5.2}$) и организационных стандартов ($PO_{5.3}$).

6. **Волевой компонент (**PB_6**)** – непрерывное профессиональное развитие ($PB_{6.1}$) и решительность в принятии критических решений ($PB_{6.2}$).

7. **Профессиональный интерес (**$РИ_7$**)** – стратегическое планирование задач ($РИ_{7.1}$) и способность к реализации нестандартных, инновационных решений ($РИ_{7.2}$).

Оценка каждого компонента осуществляется с применением нормированной функции желательности Харрингтона, позволяющей перевести качественные экспертные суждения в количественную шкалу $[0; 1]$. Границы интервалов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Шкала нормированной оценки по функции желательности Харрингтона

Качественный уровень	Диапазон значений функции	Интерпретация
Очень высокий	0,81–1,00	Превосходное соответствие, проактивное поведение
Высокий	0,64–0,80	Уверенное выполнение, минимальные отклонения
Удовлетворительный	0,38–0,63	Допустимый уровень, требуется корректировка
Низкий	0,21–0,37	Критические пробелы, необходим внешний контроль
Критический	0,00–0,20	Несоответствие требованиям, высокий риск ошибки

Интегральные оценки первых пяти компонент рассчитываются как средневзвешенные нормированные значения их субпоказателей:

$$\mathrm{PO}_1 = \frac{1}{6}\sum_{j=1}^{6} y_{\mathrm{PO}_{1.j}},\quad \mathrm{PO}_2 = \frac{1}{3}\sum_{j=1}^{3} y_{\mathrm{PO}_{2.j}},\quad \mathrm{PO}_3 = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{2} y_{\mathrm{PO}_{3.j}},$$
$$\mathrm{PO}_4 = \frac{1}{3}\sum_{j=1}^{3} y_{\mathrm{PO}_{4.j}},\quad \mathrm{PO}_5 = \frac{1}{3}\sum_{j=1}^{3} y_{\mathrm{PO}_{5.j}}, \qquad (4)$$

где $y_{\mathrm{PO}_{i.j}} \in [0; 1]$ – значение функции желательности для j-го субпоказателя i-й категории ответственности.

Математическая модель оценки ценностных показателей

Для агрегации когнитивно-волевых детерминант в единый критерий вводятся нормированные коэффициенты важности, отражающие относительную значимость категорий ответственности, волевого компонента и профессионального интереса. Матрица парных сравнений и расчёт весов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты важности ценностных показателей профессиональной деятельности НЛ

Показатель	РО	РВ	РИ	Абсолютный вес	Относительный вес, α
РО	1	2	2	5	0,55
РВ	0	1	2	3	0,33
РИ	0	0	1	1	0,12
Итого				**9**	**1,00**

Интегральный показатель когнитивно-волевых аспектов и профессионального интереса ($K_{\text{кв}}$) вычисляется по формуле:

$$K_{\text{кв}} = \alpha_{\text{РО}} \cdot \text{РО} + \alpha_{\text{РВ}} \cdot \text{РВ} + \alpha_{\text{РИ}} \cdot \text{РИ}, \qquad (5)$$

где $\text{РО} = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5} \mathrm{PO}_i$ – обобщённая категория ответственности, РВ и РИ – нормированные оценки волевого компонента и профессионального интереса соответственно.

Подстановка максимально возможных значений ($\mathrm{PO}_i = \text{РВ} = \text{РИ} = 1$) даёт теоретический верхний предел когнитивно-волевого критерия:

$$K_{\text{кв}}^{\max} = 5 \cdot 0{,}55 \cdot 1 + 2 \cdot 0{,}33 \cdot 1 + 2 \cdot 0{,}12 \cdot 1 = 3{,}65. \qquad (6)$$

Данное значение служит нормировочным базисом для последующей интеграции с процедурными показателями СУБ.

Интегральный критерий и нормирование результативности НЛ

С учётом введённых детерминант обобщённая модель оценки эффективности назначенного лица приобретает вид:

$$K_{\text{НЛ}}^{\text{баз}} = \sum_{i=1}^{8} \alpha_i \cdot V(\text{Ц}_i) \cdot K_{\text{кв}}, \qquad (7)$$

где $V(Ц_i)$ – техническая полезность достижения i-й цели СУБ (формула 1), α_i – её весовой коэффициент (табл. 2), $K_{кв}$ – нормированный когнитивно-волевой множитель, определяемый по формуле (5).

При достижении максимальных значений по всем подцелям и когнитивно-волевым детерминантам базовый интегральный показатель без учёта знаний нормативной документации составляет:

$$K_{НЛ}^{баз,\ max} \approx 3{,}69 \approx 3{,}7. \quad (8)$$

Полученный порог (3,7) интерпретируется как эталонный уровень профессионально-ценностного качества НЛ, соответствующий полному соответствию требованиям МКУБ, оптимальному когнитивно-волевому профилю и высокой мотивационной готовности.

Оценка профессионально-ценностных качеств назначенного лица на основе анализа знаний нормативно-технической документации

Иерархическая система нормативных документов и её роль в экологическом менеджменте

Процедурное соответствие требованиям Международного кодекса по управлению безопасностью и развитые когнитивно-волевые детерминанты сами по себе не гарантируют эффективности назначенного лица без глубокого системного знания нормативно-технической документации. В предлагаемой модели уровень знания документации рассматривается как обязательный мультипликатор профессиональной пригодности, непосредственно влияющий на качество принятия экологически значимых управленческих решений.

Нормативно-техническая база структурирована в виде пяти иерархических групп, ранжированных по степени нормативной обязывающей силы и непосредственного влияния на экологическую безопасность судна.

1. **ЗД$_1$ – Международные нормативно-правовые акты ИМО** (SOLAS, MARPOL, ISM Code, Резолюции MSC/MEPC). Формируют глобальный каркас требований к предотвращению загрязнения и обеспечению безопасности.
2. **ЗД$_2$ – Национальные нормативно-правовые акты Российской Федерации** (Кодекс торгового мореплавания, Приказы Минтранса РФ, Правила Российского морского регистра судоходства, ГОСТы по СУБ). Обеспечивают имплементацию международных стандартов в национальную правовую среду.
3. **ЗД$_3$ – Внутренние документы судоходной компании по СУБ** (Руководство по управлению безопасностью, приказы, процедуры, инструкции береговых служб). Детализируют требования применительно к операционной модели конкретной компании.
4. **ЗД$_4$ – Судовая документация по СУБ** (Судовое руководство по безопасности, чек-листы, планы ликвидации разливов, расписания по тревогам). Локализуют требования на уровне конкретного судна, его типа, маршрутов и перевозимых грузов.
5. **ЗД$_5$ – Общетехническая и методическая литература** (руководства по действиям в аварийных ситуациях, учебные материалы, отраслевые рекомендации). Обеспечивают непрерывное профессиональное развитие и расширение экспертного кругозора НЛ.

Оценка знания каждой группы осуществляется с применением нормированной функции желательности Харрингтона (табл. 2), что позволяет перевести качественные экспертные заключения в количественную шкалу $y_{ЗДi} \in [0; 1]$.

Математическая модель расчёта уровня знания документации

Для агрегации разнородных групп документов в единый показатель вводятся коэффициенты важности, рассчитанные методом парного сравнения (табл. 4). Максимальный вес присвоен международным актам ИМО ($\alpha_{ЗД1} = 0{,}27$), что отражает их приоритетность в системе экологического регулирования морского судоходства.

Таблица 4

Коэффициенты важности групп нормативных документов

Группа документов	Абсолютный вес $\sum a_{ij}$	Относительный вес $\alpha_{ЗДi}$
ЗД$_1$ (Международные акты ИМО)	8	0,27
ЗД$_2$ (Национальные акты РФ)	7	0,23
ЗД$_3$ (Документы СК по СУБ)	6	0,20
ЗД$_4$ (Судовая документация по СУБ)	5	0,17
ЗД$_5$ (Общетехническая литература)	4	0,13
Итого	**30**	**1,00**

Интегральный уровень знания документации (УЗД$_{НЛ}$) рассчитывается как средневзвешенное значение нормированных оценок по всем группам:

$$УЗД_{НЛ} = \sum_{i=1}^{5} \alpha_{ЗДi} \cdot y_{ЗДi}, \quad (9)$$

где $y_{ЗДi}$ – значение функции желательности для i-й группы документов, определяемое через долю корректно идентифицированных и интерпретированных нормативных положений от общей мощности множества документов группы. При полном знании всех документов УЗД$_{НЛ}$= 1,0.

Интегральный критерий эффективности и шкала доверия

Окончательная интегральная оценка профессионально-ценностного качества назначенного лица формируется путём умножения базового показателя (формула 7) на нормированный уровень знания документации:

$$K_{НЛ}^{\Sigma} = K_{НЛ}^{баз} \cdot УЗД_{НЛ}, \quad (10)$$

где $K_{НЛ}^{баз}$ – интегральный показатель, учитывающий достижение целей СУБ и когнитивно-волевые детерминанты (макс. $\approx 3{,}7$); $УЗД_{НЛ}$ – коэффициент компетентности в нормативной базе.

Для обеспечения оперативности управленческих решений полученное значение нормируется к шкале доверия, определяющей степень самостоятельности НЛ при принятии экологически значимых решений (табл. 5).

Таблица 5

Шкала доверия к профессиональным действиям назначенного лица

Нормированный показатель $K_{НЛ}^{норм}$	Уровень доверия	Управленческая рекомендация
$0{,}84–1{,}00$	Полное доверие	Самостоятельное принятие решений, статус эксперта-аудитора СУБ
$0{,}66–0{,}83$	Доверие с контролем критических задач	Допуск к оперативному управлению с периодическим аудитом ключевых процедур
$0{,}42–0{,}65$	Обязательный контроль всех действий	Работа под непосредственным руководством главного специалиста СК, запрет на единоличное принятие решений по экологическим рискам
$0{,}25–0{,}41$	Проверка морально-волевой устойчивости	Приостановка допуска, направление на внеочередную аттестацию и тренажёрную подготовку
$< 0{,}25$	Несоответствие требованиям	Отстранение от должности, инициирование процедуры замены НЛ

Интеграция оценки НЛ в систему классификации экологических рисков

Разработанный алгоритм обеспечивает прямую количественную связь между уровнем профессионально-ценностного качества назначенного лица и надёжностью системы классификации экологических проблем водного транспорта. Высокий показатель $K_{НЛ}^{\Sigma}$ свидетельствует о способности НЛ к следующим действиям.

- **Корректно идентифицировать** потенциальные источники загрязнения (разливы нефтепродуктов, выбросы серы/азота, сброс льяльных и балластных вод, утечка опасных химических веществ).
- **Классифицировать инциденты по масштабу воздействия**: локальный (в пределах судна или причальной зоны), региональный (акватория порта, бухты, устья рек), трансграничный (открытые морские экосистемы, особо охраняемые природные территории).
- **Ранжировать стадии развития угрозы**: потенциальная угроза (отклонения параметров в допустимых пределах), начальная стадия (локализованное воздействие, требует превентивных мер), критическое развитие (массовый выброс, угроза биоценозу, требует активации международных протоколов реагирования).

Таким образом, назначенное лицо выступает не только административным звеном СУБ, но и ключевым аналитическим узлом в системе проактивного экологического мониторинга. Количественная оценка его компетенций позволяет судоходным компаниям и надзорным органам обоснованно распределять ресурсы на подготовку персонала, модернизировать системы контроля и минимизировать вероятность перерастания локальных нарушений в масштабные экологические катастрофы.

Заключение

В ходе исследования разработан и математически обоснован алгоритм интеллектуальной оценки эффективности профессионально-ценностных действий назначенного лица (НЛ) по обеспечению экологической безопасности судна, интегрированный в систему классификации экологических проблем водного транспорта.

Основные научные и практические результаты работы формулируются следующим образом.

1. Выполнена структурная декомпозиция требований Международного кодекса по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращением загрязнения (МКУБ), позволившая выделить восемь ключевых целей и 71 подцель профессиональной деятельности НЛ. На основе метода экспертного парного сравнения рассчитаны нормированные коэффициенты важности целей, что обеспечило строгую количественную основу для последующей оценки эффективности.

2. Разработана математическая модель интегрального показателя качества НЛ, представляющая собой взвешенную сумму технических полезностей всех выделенных целей с учётом их относительной значимости. Использование принципа максимизации технической полезности и функции желательности Харрингтона позволило автоматизировать нормирование разнородных критериев и формализовать процесс оценки в условиях операционной неопределённости.

3. Структурированы когнитивно-волевые детерминанты профессиональной пригодности НЛ по семи ключевым компонентам (превентивные

действия, формирование резервов, управление рисками, готовность к ЧС, дисциплинарная ответственность, волевой компонент, профессиональный интерес). Для каждого компонента предложена система количественно оцениваемых субпоказателей и методика расчёта интегральных значений через нормированную функцию желательности.

4. Формализована процедура оценки уровня знания нормативно-технической документации, включающая пять иерархических групп документов (международные акты ИМО, национальные нормативные акты РФ, внутренние документы судоходной компании, судовая документация по СУБ, общетехническая литература). Рассчитаны весовые коэффициенты групп документов и выведено математическое выражение для интегрального уровня знания документации ($УЗД_{НЛ}$).

5. **Ключевым результатом исследования** является установление прямой количественной связи между интегральным показателем профессионально-ценностного качества НЛ ($K_{НЛ}^{\Sigma}$) и надёжностью системы классификации экологических рисков водного транспорта. Высокий уровень компетенций НЛ обеспечивает: – **корректную идентификацию** потенциальных источников загрязнения (разливы нефтепродуктов, выбросы серы/азота, сброс льяльных и балластных вод, утечка опасных химических веществ); – **классификацию инцидентов по масштабу воздействия**: локальный (в пределах судна или причальной зоны), региональный (акватория порта, бухты, устья рек), трансграничный (открытые морские экосистемы, особо охраняемые природные территории); – **ранжирование стадий развития угрозы**: потенциальная угроза (отклонения параметров в допустимых пределах), начальная стадия (локализованное воздействие, требует превентивных мер), критическое развитие (массовый выброс, угроза биоценозу, требует активации международных протоколов реагирования).

6. Предложена шкала доверия к профессиональным действиям НЛ, определяющая степень самостоятельности при принятии экологически значимых управленческих решений. Нормированный показатель $K_{НЛ}^{норм}$ позволяет обоснованно распределять ресурсы на подготовку персонала, модернизировать системы контроля и минимизировать вероятность перерастания локальных нарушений в масштабные экологические катастрофы.

Практическая реализация разработанного алгоритма соответствует требованиям Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (MARPOL), Международного кодекса по управлению безопасностью (МКУБ/ISM Code) и Руководства ИМО по формальной оценке безопасности (FSA). Его внедрение в практику судоходных компаний, классификационных обществ и органов государственного экологического контроля обеспечит переход от нормативно-описательного подхода к количественному, проактивному управлению экологической безопасностью морских перевозок.

Перспективными направлениями развития исследования являются интеграция предложенной модели с цифровыми двойниками судов, адаптация алгоритмов к потоку данных в реальном времени (IoT-датчики, AIS-телеметрия, системы компьютерного зрения), а также валидация на ретроспективных базах морских инцидентов с учётом климатических особенностей акваторий и специфики грузовых операций.

Литература

1. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VI. Санкт-Петербург: Российский морской регистр судоходства, 2019.
2. Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации. М.: Издательство «Ось-89», 1999. 144 с.
3. Резолюция А.741(18). Международный кодекс по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращением загрязнения (Международный кодекс по управлению безопасностью (МКУБ)). 4 ноября 1993.
4. Скороходов Д. А., Каминский В. Ю., Кузнецова Е. Ю. Оценка эффективности обеспечения экологической безопасности персонала судна // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 1-1. С. 128–133.
5. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А., Маринов М. Л. Систематизация экологических факторов среды обитания судового экипажа // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 1-1(51). С. 53–63.
6. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А., Турусов С. Н. Показатели экологической безопасности водного транспорта // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 3-1(53). С. 161–170.
7. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А., Кузнецова Е. Ю. Оценка эффективности обеспечения экологической безопасности персонала судна // Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, № 1(55). С. 128–132.
8. 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.
9. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А., Кузнецова Е. Ю., Маринов М. Л. Оценка влияния свойств судна на его экологическую безопасность // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2-1(56). С. 168–173.
10. Скороходов Д. А., Маринов М. Л., Каминский В. Ю. Системные принципы обеспечения экологической безопасности транспортной системы Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1-1(63). С. 181–190.
11. Каминский В. Ю., Маринов М. Л., Скороходов Д. А. Методика учёта профессионально-ценностного аспекта действий судоводителя во время тренажёрной подготовки // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-1(39). С. 209–214.
12. Скороходов Д. А., Маринов М. Л., Каминский В. Ю. Алгоритм оценки профессионально-ценностных качеств начальника службы эксплуатации реакторно-турбинного и транспортно-технологического оборудования плавучей атомной станции // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 3-1. С. 230–238.

13. Скороходов Д. А., Каминский В. Ю., Маринов М. Л. Алгоритм оценки профессионально-ценностных качеств инженера-электромеханика плавучей атомной электростанции // Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 2-1. С. 334–340.
14. Скороходов Д. А., Каминский В. Ю., Маринов М. Л. Алгоритм оценки эффективности профессионально-ценностных действий капитана по обеспечению экологической безопасности нефтеналивного судна // Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 2-1. С. 326–333.

References

1. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Chast’ VI [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part VI]. St. Petersburg: Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, 2019.
2. Kodeks torgovogo moreplavaniya Rossiyskoy Federatsii [Merchant Shipping Code of the Russian Federation]. Moscow: Os’-89, 1999. 144 p.
3. Rezolyutsiya A.741(18). Mezhdunarodnyy kodeks po upravleniyu bezopasnoy ekspluatatsiey sudov i predotvrashcheniem zagryazneniya (Mezhdunarodnyy kodeks po upravleniyu bezopasnost’yu (MKUB)) [Resolution A.741(18). International Management Code for the Safe Operation of Ships and for Pollution Prevention (International Safety Management Code (ISM Code))]. November 4, 1993.
4. Skorokhodov D. A., Kaminsky V. Yu., Kuznetsova E. Yu. Otsenka effektivnosti obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti personala sudna [Evaluation of the Effectiveness of Ensuring Environmental Safety of Ship's Personnel] // Marine Intelligent Technologies. 2022. No. 1-1. Pp. 128–133.
5. Kaminsky V. Yu., Skorokhodov D. A., Marinov M. L. Systematizatsiya ekologicheskikh faktorov sredy obitaniya sudovogo ekipazha [Systematization of Environmental Factors of the Ship's Crew's Habitat] // Marine Intelligent Technologies. 2021. No. 1-1(51). Pp. 53–63.
6. Kaminsky V. Yu., Skorokhodov D. A., Turusov S. N. Pokazateli ekologicheskoy bezopasnosti vodnogo transporta [Environmental Safety Indicators for Water Transport] // Marine Intelligent Technologies. 2021. No. 3-1(53). Pp. 161–170.
7. Kaminsky V. Yu., Skorokhodov D. A., Kuznetsova E. Yu. Otsenka effektivnosti obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti personala sudna [Assessment of Crew Environmental Safety Effectiveness] // Marine Intelligent Technologies. 2022. Vol. 1, No. 1(55). Pp. 128–132.
8. Kaminsky V. Yu., Skorokhodov D. A., Kuznetsova E. Yu. Otsenka ekologicheskoy bezopasnosti vodnoy transportirovki gruzov [Assessing the Environmental Safety of Water Cargo Transportation] // Marine Intelligent Technologies. 2022. No. 3-1(57). Pp. 212–219.
9. Kaminsky V. Yu., Skorokhodov D. A., Kuznetsova E. Yu., Marinov M. L. Otsenka vliyaniya svoystv sudna na ego ekologicheskuyu bezopasnost’ [Assessment of Ship Properties Impact on Environmental Safety] // Marine Intelligent Technologies. 2022. No. 2-1(56). Pp. 168–173.
10. Skorokhodov D. A., Marinov M. L., Kaminsky V. Yu. Sistemnye printsipy obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti transportnoy sistemy Severnogo morskogo puti [Systematic Principles of Ensuring Environmental Safety of the Northern Sea Route Transport System] // Marine Intelligent Technologies. 2024. No. 1-1(63). Pp. 181–190.
11. Kaminsky V. Yu., Marinov M. L., Skorokhodov D. A. Metodika ucheta professional’no-tsennostnogo aspekta deystviy sudovoditelya vo vremya trenazhernoy podgotovki [Methodology for Accounting for the Professional-Value Aspect of a Navigator's Actions During Simulator Training] // Marine Intelligent Technologies. 2018. No. 1-1(39). Pp. 209–214.
12. Skorokhodov D. A., Marinov M. L., Kaminsky V. Yu. Algoritm otsenki professional’no-tsennostnykh kachestv nachal’nika sluzhby ekspluatatsii reaktorno-turbinnogo i transportno-tekhnologicheskogo oborudovaniya plavuchey atomnoy stantsii [Algorithm for Assessing the Professional-Value Qualities of the Head of the Reactor-Turbine and Transport-Technological Equipment Operation Service of a Floating Nuclear Power Plant] // Marine Intelligent Technologies. 2024. No. 3-1. Pp. 230–238.
13. Skorokhodov D. A., Kaminsky V. Yu., Marinov M. L. Algoritm otsenki professional’no-tsennostnykh kachestv inzhenera-elektromekhanika plavuchey atomnoy elektrostantsii [Algorithm for Assessing Professional-Value Qualities of an Electrical Engineer at a Floating Nuclear Power Plant] // Marine Intelligent Technologies. 2025. No. 2-1. Pp. 334–340.
14. Skorokhodov D. A., Kaminsky V. Yu., Marinov M. L. Algoritm otsenki effektivnosti professional’no-tsennostnykh deystviy kapitana po obespecheniyu ekologicheskoy bezopasnosti neftenalivnogo sudna [Algorithm for Assessing the Effectiveness of the Captain's Professional-Value Actions to Ensure Environmental Safety of an Oil Tanker] // Marine Intelligent Technologies. 2025. No. 2-1. Pp. 326–333.

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

Скороходов 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

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

Маринов Марин Любенов, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: marinlomsky@gmail.com

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

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

Marin L. Marinov, candidate of technical sciences, leading researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: marinlomsky@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 22.06.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.06.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 10.07.2026.

Научная статья
УДК 656.62
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.056

Архитектура подводной транспортной инфраструктуры на основе роевых систем автономных необитаемых подводных аппаратов

Каминский В.Ю. [1] Kaminskyvy@yandex.ru, **Андреюк Н.Р.**[1] natalia_prima@mail.ru,
Скороходов Д.А.[1] skorohodda@mail.ru
[1]Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. В статье представлена концепция архитектуры подводной транспортной инфраструктуры, основанной на применении роевых систем автономных необитаемых подводных аппаратов. Разработана многоуровневая модель, включающая мобильные транспортные агенты, подводные станции, информационно-коммуникационную среду и стратегический уровень управления. Рассмотрены принципы самоорганизации, децентрализованного управления и коллективного взаимодействия аппаратов, обеспечивающие адаптивность и устойчивость системы в условиях неопределённой подводной среды. Проанализированы ключевые аспекты функционирования инфраструктуры, включая энергетическое обеспечение, пространственную оптимизацию размещения элементов, отказоустойчивость и экологическую безопасность. Особое внимание уделено механизмам повышения эффективности транспортных операций за счёт распределения задач между элементами роя и динамического перестроения системы. Показано, что использование роевых подходов позволяет существенно повысить эффективность подводной логистики за счёт масштабируемости, гибкости и устойчивости к внешним воздействиям. Определены ограничения предложенного подхода и намечены направления дальнейших исследований, связанные с учётом гидродинамических факторов и развитием цифровых технологий управления.
Ключевые слова: автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), роевой интеллект, подводная логистика, распределенные системы управления, подводная транспортировка грузов.
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: Каминский В.Ю., Андреюк Н.Р., Скороходов Д.А. Архитектура подводной транспортной инфраструктуры на основе роевых систем автономных необитаемых подводных аппаратов, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 275—281. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.056

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.056

Architecture of underwater transport infrastructure based on swarm systems of autonomous unmanned underwater vehicles

Valery Yu. Kaminsky[1] Kaminskyvy@yandex.ru, **Natalia R. Andreyuk**[1] natalia_prima@mail.ru,
Dmitriy A. Skorokhodov[1] skorohodda@mail.ru,
[1]Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences

Abstract. The paper presents a concept of an architecture for underwater transport infrastructure based on swarm systems of autonomous unmanned underwater vehicles. A multi-level model is developed, including mobile transport agents, underwater stations, an information and communication environment, and a strategic control level. The principles of self-organization, decentralized control, and collective interaction of vehicles are considered, ensuring system adaptability and robustness under uncertain underwater conditions. Key aspects of infrastructure operation are analyzed, including energy supply, spatial optimization of system elements, fault tolerance, and environmental safety. Particular attention is paid to mechanisms for improving the efficiency of transport operations through task distribution among swarm elements and dynamic system reconfiguration. It is shown that the application of swarm-based approaches significantly enhances the efficiency of underwater logistics due to scalability, flexibility, and resilience to external disturbances. The limitations of the proposed approach are identified, and directions for further research are outlined, including consideration of hydrodynamic effects, and the development of digital control technologies.
Keywords: autonomous underwater vehicles (AUV), swarm intelligence, underwater logistics, distributed control systems, underwater cargo transportation.
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: Valery Yu. Kaminsky, Natalia R. Andreyuk, Dmitriy A. Skorohodov. Architecture of underwater transport infrastructure based on swarm systems of autonomous unmanned underwater vehicles, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 275—281. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.056

© Каминский В.Ю., Андреюк Н.Р., Скороходов Д.А. 2026

Введение

Современное развитие морской логистики и освоения подводного пространства характеризуется переходом от использования отдельных автономных решений к формированию комплексных инфраструктурных систем. В условиях роста объёмов подводных работ, включая добычу ресурсов, экологический мониторинг и транспортировку грузов, возрастает потребность в устойчивых, масштабируемых и автономных транспортных системах.

Одним из перспективных направлений является применение принципов роевого интеллекта, обеспечивающих координацию поведения множества автономных агентов на основе локального взаимодействия. В отличие от централизованных систем, такие подходы характеризуются повышенной адаптивностью, отказоустойчивостью и гибкостью управления [1-4].

Целью настоящей работы является разработка архитектуры подводной транспортной инфраструктуры, основанной на взаимодействии роевых систем автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) и стационарных подводных объектов.

Научная новизна работы заключается в разработке многоуровневой архитектуры подводной транспортной инфраструктуры, встраивающей роевые системы автономных необитаемых подводных аппаратов, подводные станции и распределённую информационно-коммуникационную среду в единую логистическую систему. Предложенная модель учитывает механизмы динамического перестроения роя и маршрута, распределённого управления и энергетической адаптации, обеспечивающих повышение отказоустойчивости, масштабируемости и экологической устойчивости подводных транспортных операций.

Архитектура системы

Предлагаемая архитектура подводной транспортной инфраструктуры формируется как многоуровневая система, сочетающая иерархическую организацию с распределённым принципом функционирования. В её составе выделяются четыре взаимосвязанных уровня: уровень мобильных транспортных агентов, уровень подводных станций, информационно-коммуникационный уровень и стратегический, т.е. самый общий, верхний, уровень управления.

Такое построение обеспечивает разделение функций между элементами системы при сохранении их согласованного взаимодействия.

Уровень мобильных транспортных агентов

На нижнем уровне располагаются роевые группы автономных необитаемых подводных аппаратов, выполняющие транспортировку грузов. Каждый аппарат является интеллектуальным агентом, обладающим средствами автономной навигации, позволяющими функционировать в условиях отсутствия спутниковых сигналов и ограниченной видимости. [3, 5, 6]

Ключевым свойством является способность к локальному взаимодействию, обеспечивающему согласование движения, распределение ролей и предотвращение конфликтов в группе. Это достигается за счёт реализации алгоритмов роевого поведения и обмена данными по гидроакустическим каналам связи.

Аппараты оснащаются унифицированными модулями стыковки с грузовыми контейнерами, что позволяет динамически изменять конфигурацию транспортного роя. Дополнительно устанавливаются системы самодиагностики, обеспечивающие контроль технического состояния и адаптацию структуры роя при возникновении неполадок.

Уровень подводных транспортных станций

Подводные транспортные станции выполняют роль логистических узлов, аналогичных портовой инфраструктуре в надводных системах. Они обеспечивают приём, хранение и передачу грузов, а также техническое обслуживание и энергетическое обеспечение АНПА.

Функционально станции включают доковые модули, системы зарядки или замены энергетических блоков, а также коммуникационные узлы для ретрансляции данных. Пространственное размещение станций определяется требованиями логистической эффективности, особенностями рельефа дна и плотностью транспортных потоков.

Информационно-коммуникационный уровень

Информационный уровень обеспечивает координацию всех элементов системы. Основным каналом связи является гидроакустическая коммуникация, характеризующаяся ограниченной пропускной способностью и высокой задержкой.

В связи с этим целесообразен гибридный подход, включающий локальные сети взаимодействия между аппаратами, ретрансляцию через станции и передачу агрегированных данных на надводные центры управления. Важным элементом является формирование цифрового двойника системы, позволяющего осуществлять мониторинг и прогнозирование состояния системы.

Стратегический уровень управления

Несмотря на децентрализованный характер управления на уровне роя, общее планирование осуществляется на стратегическом уровне. Здесь решаются задачи оптимизации маршрутов, распределения функций и анализа эффективности эксплуатации системы.

Данный уровень реализует принципы облачных вычислений и не вмешивается в локальное управление, обеспечивая лишь задание целевых параметров.

Основные функциональные элементы предлагаемой инфраструктуры, их назначение и технические характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1

Функциональные элементы подводной транспортной инфраструктуры

Элемент системы	Основные функции	Технические характеристики	Роль в транспортной системе
Рой автономных подводных аппаратов	Транспортировка грузов, навигация, коллективное управление	Автономная навигация, сенсорные системы, модуль крепления груза	Мобильный транспортный компонент
Подводная транспортная станция	Приём и отправка грузов, обслуживание аппаратов	Док-камеры, системы зарядки, складские модули	Узловой элемент логистической сети
Подводный энергетический модуль	Обеспечение энергией аппаратов	Аккумуляторные станции, индукционная зарядка	Поддержание автономности системы
Коммуникационный узел	Передача информации	Гидроакустическая связь, оптоволоконные линии	Координация работы роя
Центр мониторинга	Анализ данных и планирование миссий	Серверные системы, цифровые двойники	Стратегическое управление системой

Применение системы в задачах подводной логистики

Предлагаемая архитектура подводной транспортной инфраструктуры ориентирована на решение широкого круга задач подводной логистики, связанных с перемещением грузов в условиях ограниченной доступности традиционных транспортных средств. Использование роевых систем АНПА позволяет реализовать распределённую модель транспортировки, в которой функции доставки выполняются группой координированных аппаратов, взаимодействующих на основе локальных правил и систем искусственного интеллекта [7].

К числу основных сценариев применения относятся транспортировка контейнерных грузов между подводными технологическими объектами, обеспечение снабжения удалённых морских платформ, подводных станций, а также доставка оборудования и материалов в районы проведения подводных работ [8-11].

На рис. 1 показан рост пропускной способности грузоперевозок с увеличением числа аппаратов. В отличие от одиночных аппаратов, роевые системы обеспечивают гибкое масштабирование транспортной мощности за счёт изменения количества задействованных АНПА, что позволяет адаптироваться к изменяющимся объёмам грузопотоков.

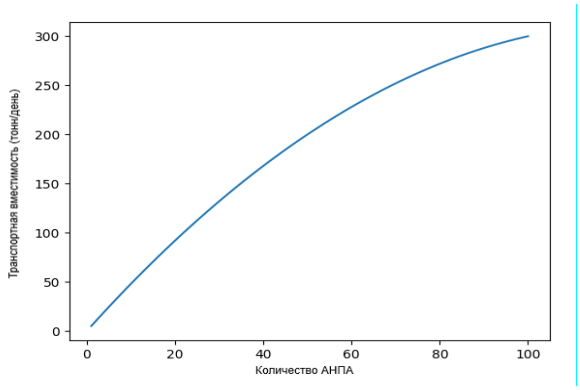


Рис. 1. Масштабируемость роевой системы

Особое значение имеет возможность транспортировки экологически чувствительных и потенциально опасных грузов. Распределение нагрузки между элементами роя снижает критичность выхода из строя отдельного аппарата и уменьшает вероятность аварий с тяжёлыми последствиями. Дополнительно обеспечивается повышение устойчивости логистических операций за счёт динамического перестроения маршрутов и структуры роя.

Таким образом, применение роевых систем АНПА формирует основу для создания адаптивных и устойчивых подводных логистических систем, способных функционировать в условиях неопределённости и ограниченной коммуникации, характерных для подводной среды.

Функциональная модель

Функционирование системы представляется в виде циклического процесса, включающего последовательность взаимосвязанных этапов. На первом этапе осуществляется формирование транспортной миссии, в рамках которой задаются параметры груза, маршрут и временные ограничения.

Далее выполняется конфигурация роя АНПА с учётом энергетических и технических характеристик аппаратов. После этого реализуется операция стыковки с грузовыми модулями и начинается транспортировка по адаптивному маршруту.

В процессе движения параметры маршрута могут корректироваться в реальном времени на основе данных сенсоров и информации о внешней среде. Завершающим этапом является передача груза на станции назначения и перераспределение ресурсов системы.

Система энергетического обеспечения роя АНПА

Система энергетического обеспечения является критическим элементом подводной транспортной инфраструктуры и определяет радиус действия, автономность и эффективность функционирования каждого АНПА отдельно и роя в целом. Возможны различные варианты её реализации, включая централизованные, модульные и распределённые схемы.

Централизованный подход предполагает возврат аппаратов на станции для подзарядки, что упрощает инфраструктуру, но ограничивает дальность операций. Модульная схема основана на замене энергетических блоков и обеспечивает высокую оперативность обслуживания. Распределённый подход предусматривает использование сети подводных зарядных узлов, увеличивая автономность системы.

Наиболее перспективным является гибридный вариант, сочетающий преимущества указанных решений и обеспечивающий баланс между эксплуатационной эффективностью и сложностью реализации.

Основные преимущества, ограничения и области применения различных типов энергетических систем приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение вариантов энергетического обеспечения инфраструктуры

Тип энергетической схемы	Принцип работы	Преимущества	Ограничения	Область применения
Централизованная зарядка	Аппараты возвращаются на станцию	Простота инфраструктуры	Ограниченный радиус действия	Прибрежные системы
Замена энергетических модулей	Замена аккумуляторных блоков	Высокая скорость обслуживания	Сложность механических систем	Интенсивная логистика
Подводные зарядные станции	Распределённые станции зарядки	Большая автономность	Высокая стоимость инфраструктуры	Дальние маршруты
Гибридная схема	Комбинация предыдущих методов	Высокая гибкость	Сложность управления	Крупные транспортные сети

На графике (рис. 2) показано, что роевые системы демонстрируют более низкие энергозатраты по сравнению с одиночными аппаратами и надводными перевозками на малой и средней дистанции.

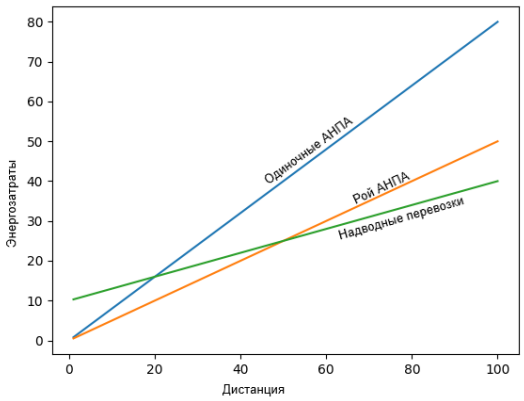


Рис. 2. Энергетическая эффективность перевозки грузов

Пространственная оптимизация

Размещение элементов подводной транспортной инфраструктуры может быть сформулировано как задача оптимизации покрытия области с множеством критериев. Целевая функция минимизирует суммарные энергетические затраты системы при заданных ограничениях на время доставки, пропускную способность узлов и доступность подводных станций. Дополнительно учитываются требования к устойчивости маршрутов и равномерности распределения транспортной нагрузки.

Ключевыми параметрами являются радиус действия аппаратов, характеристики их энергетических систем, плотность транспортных потоков и геометрические особенности морского дна. Существенное влияние оказывают внешние условия, включая течения и наличие препятствий, что требует учёта изменчивости среды при планировании инфраструктуры. В связи с этим задача размещения элементов системы может рассматриваться как обобщение задач размещения логистических узлов с учётом динамических ограничений.

Особенностью предлагаемого подхода является возможность частичного динамического перестроения системы за счёт перераспределения мобильных агентов. Это позволяет адаптировать структуру транспортной сети к изменяющимся условиям эксплуатации, включая неравномерность грузопотоков и локальные перегрузки. Таким образом, структура транспортной сети может не только заранее планироваться, но и изменяться в зависимости от текущих условий.

Отказоустойчивость и безопасность

Высокая отказоустойчивость системы обеспечивается за счёт избыточности агентов и распределённого характера управления. Наличие множества автономных аппаратов позволяет существенно снизить влияние неполадок отдельных элементов на выполнение транспортной миссии. При выходе части аппаратов из строя происходит автоматическое перераспределение задач внутри роя без необходимости внешнего вмешательства.

Дополнительным фактором устойчивости является модульная архитектура системы, допускающая отключение или замену отдельных компонентов без нарушения её функционирования. Использование встроенных средств самодиагностики обеспечивает контроль технического состояния аппаратов и позволяет своевременно корректировать их участие в транспортных операциях.

Безопасность функционирования достигается за счёт сочетания алгоритмов коллективного поведения и технических средств контроля. Реализуются механизмы предотвращения столкновений, адаптивной навигации и резервирования каналов связи. Важную роль играет возможность

оперативной корректировки маршрутов в ответ на изменение внешних условий или возникновение нештатных ситуаций.

В целом, использование распределённых принципов управления и снижение вероятности выхода из строя всей группы роя повышают устойчивость системы к внешним воздействиям и обеспечивают надёжность выполнения транспортных операций, включая задачи с повышенными требованиями к безопасности.

График на рис. 3 показывает, что при аналогичном росте числа неполадок в одиночном АНПА и отдельных АНПА, составляющих роевую систему, снижение вероятности выполнения задачи в рамках роевой системы существенно меньше.

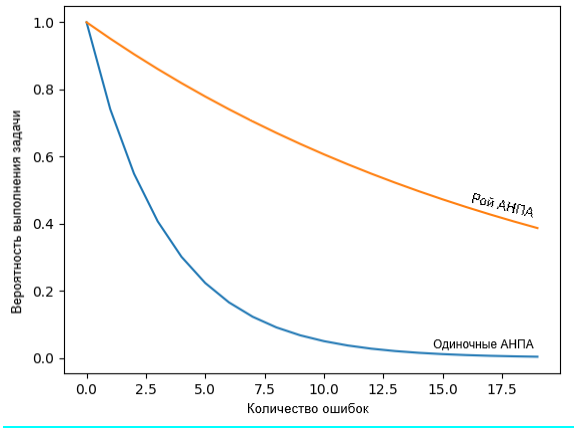


Рис. 3. Отказоустойчивость системы

Экологическая устойчивость

Экологическая устойчивость является одним из ключевых требований к подводной транспортной инфраструктуре [12]. В предлагаемой системе снижение воздействия на морские экосистемы достигается за счёт оптимизации режимов движения, распределения нагрузки и использования малошумных транспортных средств.

Роевые системы позволяют уменьшить локальную концентрацию воздействия по сравнению с традиционными транспортными средствами за счёт распределения транспортной функции между множеством аппаратов. Это приводит к снижению уровня акустического шума и уменьшению вероятности нарушения природных процессов в зоне эксплуатации.

Дополнительно обеспечивается возможность адаптивного выбора маршрутов с учётом экологических ограничений, включая зоны повышенной биологической активности и участки с особыми условиями охраны. Использование сенсорных систем и средств мониторинга позволяет учитывать состояние окружающей среды при планировании и выполнении транспортных операций.

Таким образом, предложенный подход соответствует принципам экологически устойчивого развития и может рассматриваться как альтернатива традиционным способам транспортировки в чувствительных морских акваториях.

Основные риски эксплуатации подводной транспортной инфраструктуры и методы их снижения представлены в табл. 3.

Таблица 3

Основные риски эксплуатации подводной транспортной инфраструктуры

Тип риска	Источник	Возможные последствия	Методы снижения
Навигационные	Сложный рельеф дна	Потеря аппарата	Использование карт рельефа и гидроакустических навигационных систем
Коммуникационные	Затухание гидроакустического сигнала	Потеря координации роя	Ретрансляционные станции
Энергетические	Разряд батарей	Срыв транспортной миссии	Резервные станции зарядки
Технические	Неполадки оборудования	Снижение производительности	Модульная архитектура
Экологические	Воздействие на экосистему	Ограничение эксплуатации	Экологический мониторинг

Интеграция цифровых технологий

Интеграция цифровых технологий играет важную роль в обеспечении эффективности функционирования подводной транспортной инфраструктуры. Одним из ключевых элементов является использование цифровых двойников, позволяющих формировать виртуальные модели системы и осуществлять мониторинг её состояния.

Применение методов анализа данных и машинного обучения обеспечивает возможность прогнозирования неполадок, оптимизации маршрутов и повышения эффективности использования ресурсов. На основе поступающей информации формируются модели, позволяющие учитывать изменения условий эксплуатации и корректировать параметры работы системы.

Важным направлением является реализация предиктивного технического обслуживания, при котором решения принимаются на основе фактического состояния оборудования. Это позволяет повысить надёжность системы и снизить эксплуатационные затраты.

Использование объединённых вычислительных ресурсов обеспечивает согласованную работу всех уровней управления – от отдельных аппаратов до всей транспортной системы в целом. В перспективе развитие цифровых технологий позволит реализовать более высокую степень автономности и адаптивности подводных транспортных систем.

Заключение

В работе предложена и системно обоснована архитектура подводной транспортной инфраструктуры, базирующаяся на интеграции роевых систем автономных необитаемых подводных аппаратов в единую логистическую сеть. Проведённый анализ демонстрирует, что переход от жёстких централизованных схем к децентрализованной организации транспортных операций обеспечивает существенное повышение энергетической эффективности, отказоустойчивости и адаптивности системы в условиях нестабильной гидрофизической среды за счёт механизмов локального согласования и динамического перераспределения задач.

Разработанная концептуальная модель включает строгую многоуровневую структуру, обеспечивающую непрерывное и согласованное взаимодействие мобильных транспортных агентов, стационарных подводных логистических узлов и гибридной информационно-коммуникационной среды. Подобная иерархия позволяет в полной мере реализовать принципы распределённого интеллектуального управления, минимизировать влияние задержек гидроакустической связи и обеспечить гибкую масштабируемость инфраструктуры путём оперативного изменения численности рабочей группы.

Вместе с тем в рамках текущего исследования определены ключевые методологические ограничения подхода, связанные с упрощённым учётом сложных гидродинамических взаимодействий в плотных группировках и допущением об относительной однородности технических характеристик состава роя. Выявленные ограничения, наряду с отсутствием полномасштабной натурной верификации, задают чёткие направления дальнейших исследований, ориентированных на экспериментальную отработку гетерогенных алгоритмов координации и детальное гидродинамическое моделирование.

В совокупности полученные теоретические и прикладные результаты формируют надёжный научно-методический фундамент для разработки подводных транспортных систем нового поколения, создания соответствующих отраслевых стандартов и планомерного перехода к этапам опытно-конструкторских работ с последующей практической реализацией в составе устойчивых морских логистических комплексов.

Литература

1. Beni G., Wang J. Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems. 1993.
2. Brambilla M. et al. Swarm robotics: a review. Swarm Intelligence, 2013, Vol.7 P. 1-41.
3. Yuh J. Design and Control of Autonomous Underwater Robots. Autonomous Robots, 2000, Vol.8 P.7-24.
4. Tan Y., Zheng Z. Research Advance in Swarm Robotics. Defense Technology, 2013, Vol.9 P18-39.
5. Antonelli G. Underwater Robots. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2018.
6. Whitcomb L. Underwater Robotics. IEEE International Conference on Robotics and Automation 2000, Vol.1 P. 709-716.
7. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А., Андреюк Н. Р. Подводная транспортировка грузов с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов с применением искусственного интеллекта. Сборник научных статей Международной научно-практической конференции Транспорт России: проблемы и перспективы - 2024 Санкт-Петербург, 2025г. С. 144-151.
8. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А., Андреюк Н. Р. Система автономных подводных контейнерных перевозок. Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 3-1 (69). С. 237-246.
9. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А., Андреюк Н. Р. Транспортировка грузов с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов. Сборник научных статей Международной научно-практической конференции Транспорт России: проблемы и перспективы – 2023. Санкт-Петербург, 2024г. С. 220-228.
10. Каминский В. Ю., Андреюк Н. Р., Попов В.Е., Хасая Р.Р. Инфраструктура и функциональная архитектура подводных станций для экологически устойчивых автономных контейнерных перевозок. Морские интеллектуальные технологии. 2025. №4-1 (70). С. 327-335.
11. Каминский, В. Ю., Андреюк Н. Р., Скороходов Д. А. Интеллектуальная система подводных грузоперевозок на базе автономных необитаемых подводных аппаратов. Сборник научных статей Международной научно-практической конференции Транспорт России: проблемы и перспективы–2025, Санкт-Петербург, 2026г. С. 97-101.
12. Dunbabin M., Marques L. Robots for Environmental Monitoring. IEEE Robotics Automation Magazine, 2012, Vol. 19 №1 P.24-39.

References

1. Beni G., Wang J. Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems. 1993.
2. Brambilla M. et al. Swarm robotics: a review. Swarm Intelligence, 2013, Vol.7 P. 1-41.
3. Yuh J. Design and Control of Autonomous Underwater Robots. Autonomous Robots, 2000, Vol.8 P.7-24.
4. Tan Y., Zheng Z. Research Advance in Swarm Robotics. Defense Technology, 2013, Vol.9 P18-39.
5. Antonelli G. Underwater Robots (Springer Tracts in Advanced Robotics), 2018.
6. Whitcomb L. Underwater Robotics. IEEE International Conference on Robotics and Automation 2000, Vol.1 P. 709-716.
7. Kaminsky V. Yu., Skorohodov D. A., Andreyuk N. R. Podvodnaya transportirovka gruzov s pomoshch'yu avtonomnyh neobitaemyh podvodnyh apparatov s primeneniem iskusstvennogo intellekta [Underwater cargo transportation using autonomous uninhabited underwater vehicles using artificial intelligence]. Sbornik nauchnykh statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Transport Rossii: problemy i perspektivy - 2024. Sankt-Peterburg, 2025, pp. 144-151

8. Kaminsky V.Yu., Andreyuk N.R. Sistema avtonomnyh podvodnyh kontejnernyh perevozok [An autonomous underwater container transportation system]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2025. № 3-1 (69), pp. 237—246
9. Kaminsky V. Yu., Skorohodov D. A., Andreyuk N. R. Transportirovka gruzov s pomoshch'yu avtonomnyh neobitaemyh podvodnyh apparatov [Cargo transportation using autonomous uninhabited underwater vehicles]. Sbornik nauchnykh statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Transport Rossii: problemy i perspektivy - 2023. Sankt-Peterburg, 2024, pp. 220-228
10. Yu. Kaminsky, Natalia R. Andreyuk, Viktor E. Popov, Radmir R. Khasaya, Roevoj intellekt i emerdzhentnye svojstva avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov v zadachakh podvodnoj logistiki [Infrastructure and functional architecture of underwater stations for environmentally sustainable autonomous container transportation]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2025. № 4-1 (70), pp. 327—335
11. Kaminsky V. Yu Intellektual'naya sistema podvodnykh gruzoperevozok na baze avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [An intelligent underwater cargo transportation system based on autonomous unmanned underwater vehicles]. Kaminskij V. Yu., Skorohodov D. A., Andreyuk N. R. Sbornik nauchnykh statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Transport Rossii: problemy i perspektivy -,2025, Sankt-Peterburg, 2026, pp. 97-101
12. Dunbabin M., Marques L. Robots for Environmental Monitoring. IEEE Robotics&Automation Magazine, 2012, Vol. 19 №1 P.24-39.

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

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

Андреюк Наталия Ростиславовна, младший научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: natalia_prima@mail.ru

Natalia R. Andreyuk, junior research assistant, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: natalia_prima@mail.ru

Скороходов 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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 30.06.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 07.07.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 09.07.2026.).

Научная статья
УДК 656.61.073:004.942
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.057

Принятие решений на планирование рейсов экспедиционных судов на основе логико-вероятностного подхода

Кириченко А.В.[1] kirichenkoav@gumrf.ru, **Туров Д.Е.**[1] kaf_pgt@gumrf.ru, **Шаркова В.П.**[1] sharkovavp@gumrf.ru
[1]Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

Аннотация. В статье рассматривается задача выбора технологий внепортовой выгрузки судов-снабженцев в условиях арктического экспедиционного завоза. Предложен подход, синтезирующий логико-вероятностное моделирование рисков и методы многокритериального анализа решений (MCDM). В качестве альтернативных технологий рассмотрены выгрузка с использованием рейдовых плавсредств (РПС), вертолётная выгрузка и их комбинированное применение. Разработана методика нормализации разномерных критериев «риск» и «стоимость», определения весовых коэффициентов и построения Парето-фронта для визуализации компромиссных решений. На основе расчётного примера для пяти типовых пунктов выгрузки (от благоприятных до экстремальных арктических условий) показано, что комбинированная технология является предпочтительной при экспертном приоритете безопасности (wR = 0,6). Предложенный подход преобразует дескриптивную логико-вероятностную модель в нормативный инструмент поддержки принятия решений при планировании экспедиционных рейсов.
Ключевые слова: логико-вероятностное моделирование, многокритериальный анализ решений, внепортовая выгрузка, северный завоз, рейдовые плавсредства, арктическое судоходство, Парето-оптимизация, управление рисками
Для цитирования: Кириченко А.В., Туров Д.Е., Шаркова В.П. Принятие решений на планирование рейсов экспедиционных судов на основе логико-вероятностного подхода, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 282—286. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.057

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.057

Decision-making for expedition vessel voyage planning based on a logic-probabilistic approach

Aleksandr V. Kirichenko[1] kirichenkoav@gumrf.ru, **Dmitrii E. Turov**[1] kaf_pgt@gumrf.ru,
Vasilisa P. Sharkova[1] sharkovavp@gumrf.ru
[1]Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper addresses the problem of selecting off-port discharge technologies for supply vessels under Arctic expeditionary logistics conditions. An approach is proposed that synthesises logic-probabilistic risk modelling and multi-criteria decision-making (MCDM) methods. Alternative technologies considered include discharge using roadstead floating craft (RFC), helicopter discharge, and their combined application. A methodology is developed for normalising the heterogeneous criteria of “risk” and “cost”, determining weight coefficients, and constructing a Pareto front for visualising trade-off solutions. Based on a computational example for five typical discharge sites (ranging from favourable to extreme Arctic conditions), it is shown that the combined technology is preferable under an expert priority on safety (wR = 0.6). The proposed approach transforms the descriptive logic-probabilistic model into a normative decision support tool for expedition voyage planning.
Keywords: logic-probabilistic modelling, multi-criteria decision-making, off-port discharge, northern delivery, roadstead floating craft, Arctic shipping, Pareto optimisation, risk management
For citation: Aleksandr V. Kirichenko, Dmitrii E. Turov, Vasilisa P. Sharkova, Decision-making for expedition vessel voyage planning based on a logic-probabilistic approach, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 282—286. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.057

Введение

Внепортовая грузообработка судов является критическим элементом логистического обеспечения удалённых и труднодоступных территорий Арктической зоны Российской Федерации. В условиях отсутствия стационарной портовой инфраструктуры выгрузка грузов на необорудованное побережье осуществляется с использованием различных технологических схем, каждая из которых характеризуется специфическим уровнем риска и стоимостными показателями [1, 2].

Ранее выполненное исследование [3] позволило построить логико-вероятностную модель (ЛВМ) процессов внепортовой выгрузки судов с использованием рейдовых плавсредств (РПС). Модель, основанная на иерархической декомпозиции технологического процесса (три уровня, 67 элементарных операций), обеспечивает количественную оценку интегральной вероятности безотказного выполнения полного цикла работ и идентификацию критических этапов. Однако в условиях реального планирования экспедиционных рейсов возникает необходимость выбора между альтернативными технологиями выгрузки, что

© Кириченко А.В., Туров Д.Е., Шаркова В.П. 2026

требует перехода от дескриптивного анализа к нормативному инструменту поддержки принятия решений.

В мировой практике для решения подобных задач активно применяются методы многокритериального анализа решений (Multi-Criteria Decision Making, MCDM), включая анализ иерархий (AHP), метод TOPSIS, а также построение Парето-фронта для визуализации компромиссных решений [4–7]. Концепция риск-информированного принятия решений (Risk-Informed Decision Making, RIDM) в морской логистике предполагает интеграцию количественных оценок риска с экономическими показателями для обоснования выбора оптимальной стратегии [8-10].

Цель настоящей работы — обоснование методики многокритериального выбора технологий внепортовой выгрузки (РПС, вертолётная, комбинированная) на основе логико-вероятностных оценок рисков и стоимостных показателей, адаптированной к условиям арктического экспедиционного завоза.

Методика многокритериального выбора технологии выгрузки

Логико-вероятностная модель, разработанная в предыдущем исследовании, позволяет получить ключевую количественную характеристику — вероятность безотказной работы P или, что удобнее для оптимизационных задач, интегральный риск R = 1 − P. Однако с точки зрения принятия решений в точке выгрузки оперировать только риском недостаточно, поскольку существуют бюджетные ограничения и различная стоимость доставки груза разными способами.

Для решения подобных задач в морской отрасли и транспортной логистике применяются следующие подходы:

1. Многокритериальная оптимизация (Multi-Objective Optimization) — формализация задачи поиска компромисса (Парето-оптимальных решений), где изменение одного критерия (снижение риска) неизбежно ведёт к ухудшению другого (росту стоимости).
2. Анализ иерархий (AHP) и его модификации — используется для структурирования сложной задачи выбора и получения весовых коэффициентов значимости критериев «Риск» и «Стоимость» с учётом мнения эксперта или политики компании.
3. Метод TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) — позволяет ранжировать альтернативы по близости к идеальному решению.

Предлагаемый подход является синтезом теории надёжности (логико-вероятностный метод) и теории принятия решений, что в мировой практике известно как риск-информированное принятие решений (RIDM) в морской логистике.

Рассмотрим математическую постановку задачи. Пусть для конкретного пункта внепортовой обработки i существуют j = 1, 2, …, n доступных технологий выгрузки (например, j = 1 — РПС, j = 2 — вертолётная, j = 3 — комбинированная).

Исходные данные для пункта i:

– $R_{i,j}$ — интегральный риск аварии при использовании технологии j (рассчитанный ранее ЛВМ);

– $C_{i,j}$ — прогнозируемая стоимость выполнения работ технологией j (в денежных единицах за операцию).

Поскольку критерии имеют различную размерность, необходима их нормализация к безразмерному виду:

$$R'_{i,j} = \frac{R_{i,j} - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}}, C'_{i,j} = \frac{C_{i,j} - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}, \quad (1)$$

где R_{min}, R_{max}, C_{min}, C_{max} — глобальные экстремумы по всем рассматриваемым технологиям и пунктам. Чем ближе нормализованное значение к 0, тем лучше соответствующий показатель.

С помощью экспертов методом анализа иерархий (AHP) строятся матрицы парных сравнений для критериев «Риск» и «Стоимость». На основе собственного вектора матрицы определяются веса w_R и w_C ($w_R + w_C = 1$), отражающие приоритеты организации или заказчика.

Интегральный индекс эффективности $K_{i,j}$ для технологии j в пункте i определяется как взвешенная сумма нормализованных показателей:

$$K_{i,j} = w_R \cdot (1 - R'_{i,j}) + w_C \cdot (1 - C'_{i,j}) \quad (2)$$

Выбор решения осуществляется по максимуму K, что соответствует максимизации полезности.

При параллельном применении РПС и вертолёта (комбинированная технология) общий риск определяется как произведение вероятностей отказов (при условии независимости отказов):

$$R_{comb} = R_{i,1} \cdot R_{i,2} \quad (3)$$

Стоимость комбинированной технологии является аддитивной:

$$C_{comb} = C_{i,1} + C_{i,2} \quad (4)$$

Для наглядного представления компромиссных решений на плоскость координат (C; R) наносятся точки для всех рассматриваемых технологий. Линия, соединяющая недоминируемые точки (где невозможно улучшить один критерий без ухудшения другого), является границей Парето.

Результаты расчёта

Рассмотрим, в качестве расчётного примера пять типовых пунктов выгрузки, характеризующихся различными гидрометеорологическими и береговыми условиями (табл. 1). Риски для каждой технологии получены на основе логико-вероятностного моделирования, стоимости - экспертным путём.

Таблица 1

Исходные данные для пяти пунктов выгрузки

Пункт	Условия	РПС	Верт.	Комб.
А	Штиль, ровный берег, малый объём груза	0,35 / 8	0,12 / 25	0,042 / 33
Б	Умеренное волнение, галечный пляж	0,45 / 10	0,14 / 28	0,063 / 38
В	Сильное волнение, обрывистый берег	0,60 / 12	0,18 / 32	0,108 / 44
Г	Ледовые условия, приливные течения	0,55 / 14	0,16 / 30	0,088 / 44
Д	Сильное волнение, ледовые условия	0,70 / 16	0,22 / 35	0,154 / 51

Примечание: риск комбинации рассчитан как $R_{comb} = R_{РПС} \cdot R_{верт}$, стоимость – как $C_{comb} = C_{РПС} + C_{верт}$.

Глобальные экстремумы: $R_{max} = 0,70$, $R_{min} = 0,042$, Cmax = 51 млн руб., Cmin = 8 млн руб.

Принятые веса (экспертная оценка для арктического завоза): wR = 0,6 (приоритет безопасности), $w_C = 0,4$ (стоимость).

Результаты расчёта интегрального критерия $K_{i,j}$ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результирующие значения интегрального критерия K

Пункт	РПС	Верт.	Комб.	Лучшая технология
А	0,714	0,795	0,912	Комбинация
Б	0,643	0,776	0,884	Комбинация
В	0,524	0,724	0,832	Комбинация
Г	0,557	0,752	0,850	Комбинация
Д	0,471	0,690	0,787	Комбинация

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

Во-первых, при экспертно заданных весах $w_R = 0,6$ и $w_C = 0,4$ комбинированная технология (РПС + вертолёт) является предпочтительной для всех рассмотренных типовых пунктов выгрузки. Это объясняется существенным снижением интегрального риска за счёт параллельного резервирования независимых систем выгрузки.

Во-вторых, с ухудшением условий выгрузки (от пункта А к пункту Д) абсолютные значения интегрального критерия K снижаются для всех технологий, что отражает рост как рисков, так и стоимостных затрат. Однако комбинированная технология сохраняет преимущество на всём диапазоне условий.

В-третьих, построение Парето-фронта наглядно демонстрирует, что комбинированная технология является недоминируемым решением: она обеспечивает наименьший риск при приемлемом уровне стоимости. Технология на основе РПС характеризуется минимальной стоимостью, но максимальным риском; вертолётная технология занимает промежуточное положение.

Алгоритм принятия решений при планировании рейсов

На основе проведённого исследования предлагается следующий алгоритм действий для принятия решений при планировании рейсов экспедиционных судов:

Шаг 1. Нормализация показателей. Приведение разномерных шкал риска и стоимости к безразмерному виду.

Шаг 2. Определение весов критериев. С помощью метода анализа иерархий (AHP) и экспертного опроса определяются веса wR и wC, отражающие приоритеты организации.

Шаг 3. Построение Парето-фронта. Нанесение на плоскость координат (C; R) точек для всех рассматриваемых технологий и идентификация недоминируемых решений.

Шаг 4. Вычисление интегрального показателя качества. Расчёт Ki,j по формуле (2) для каждой технологии в каждом пункте выгрузки.

Шаг 5. Выбор решения. Технология с максимальным значением K признаётся оптимальной для данного пункта.

Заключение

Таким образом, в работе предложена методика многокритериального выбора технологий внепортовой выгрузки (РПС, вертолётная, комбинация), основанная на логико-вероятностном моделировании рисков и учёте стоимости операций. Методика включает нормализацию разномерных критериев, определение весовых коэффициентов методом анализа иерархий, построение Парето-фронта и расчёт интегрального критерия эффективности.

Расчёты для пяти типовых пунктов выгрузки (от благоприятных до экстремальных арктических условий) показали, что комбинированная технология (РПС + вертолёт) является предпочтительной при экспертно заданных весах wR = 0,6 (приоритет безопасности) и wC = 0,4, поскольку обеспечивает наименьший интегральный риск при приемлемом уровне стоимости.

Разработанный подход преобразует дескриптивную логико-вероятностную модель в нормативный инструмент поддержки принятия решений, что позволяет обоснованно выбирать технологическую схему выгрузки в условиях арктической неопределённости. Полученные результаты могут быть использованы при планировании экспедиционного завоза в Арктической зоне Российской Федерации, а также для сравнительного анализа альтернативных технологических решений в других регионах со сложными навигационными и гидрометеорологическими условиями.

Дальнейшие исследования предполагают развитие методики в направлении учёта динамики гидрометеорологических условий, а также интеграцию с системами оперативного управления рейсами в реальном времени.

Литература

1. Горенькова В. С. Методика планирования перевозки и выгрузки контейнеризованных грузов во внепортовых условиях / В. С. Горенькова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 74—83. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-74-83.
2. Давыденко А. А. Технологические решения по выгрузке контейнерных грузов на необорудованное побережье в условиях Арктики / А. А. Давыденко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — №5(39). — С. 7—19. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-7-19.
3. Кириченко, А. В. Логико-вероятностное моделирование процессов внепортовой обработки судов / А. В. Кириченко, Д. Е. Туров // Транспортное дело России. — 2026. — № 2. — С. 45—52.
4. Đelović, D., Aleksić, M., Iker, O. and Chalaris, M. (2025) 'Berth Efficiency Under Risk Conditions in Seaports Through Integrated DEA and AHP Analysis', Journal of Marine Science and Engineering.
5. Gulen, M.F., Uflaz, E., Gumus, F., Orhan, M. and Arslan, O. (2025) 'An integrated SWOT-based interval type-2 fuzzy AHP and TOPSIS methodology for digital transformation strategy selection in maritime safety', Ocean Engineering, 323, p. 120518.
6. IEEE Access (2024) 'Research on Site Selection of Ship Tank Washing Stations Based on a Biobjective Optimization Model', IEEE Access, 12, pp. 88122—88133.
7. Xu, K. (2025) Decision-support frameworks for MCDA method selection and emission abatement technology assessment in the maritime sector. Doctoral Thesis. University of Southampton.
8. Реуцкий А. С. Применяемые в морской практике методы оценки рисков / А. С. Реуцкий, Д. С. Семионичев, А. А. Буцанец // Транспортное дело России. — 2025. — № 6. — С. 156–162.
9. Кузнецов А. Л. Имитационное моделирование движения судов по круговым маршрутам в условиях частичной ледовой проводки / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Н. Ситов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. No 3. 382–393. EDN CWLKUK. DOI:10.21821/2309-5180-2026-18-3-382-393. https://journal.gumrf.ru/jour/article/view/747/538
10. Шурпяк В.К. Применение методов оценки риска для определения допустимых условий ледового плавания / В.К. Шурпяк // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — No 81. — С. 12 — 28. — EDN DEOFTS
11. Скороходов, Д. А. Анализ обеспечения функциональной безопасности морского транспорта с учётом экологических аспектов / Д. А. Скороходов, И. Г. Малыгин, В. Ю. Каминский // Морские интеллектуальные технологии. – 2026. – № 1-1(71). – С. 221-229. – DOI 10.37220/MIT.2026.71.1.023. – EDN GATWWM.

References

1. Goren'kova V.S. Metodika planirovaniya perevozki i vygruzki kontejnerizirovannyh gruzov vo vneportovyh usloviyah [Methodology for Planning Transportation and Unloading of Containerized Cargo in Out-of-Port Conditions] // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. — 2024. — T. 16. — № 1. — S. 74-83. — DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-74-83.
2. Davydenko A.A. Tekhnologicheskie resheniya po vygruzke kontejnernyh gruzov na neoborudovannoe poberezh'e v usloviyah Arktiki [Technological Solutions for Unloading Container Cargo on Unequipped Coast in Arctic Conditions] // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. — 2016. — № 5(39). — S. 7-19. — DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-7-19.
3. Kirichenko A.V., Turov D.E. Logiko-veroyatnostnoe modelirovanie processov vneportovoj obrabotki sudov [Logical-Probabilistic Modeling of Ship Out-of-Port Handling Processes] // Transportnoe delo Rossii. — 2026. — № 2. — S. 45-52.
4. Đelović D., Aleksić M., Iker O. and Chalaris M. (2025) Berth Efficiency Under Risk Conditions in Seaports Through Integrated DEA and AHP Analysis. Journal of Marine Science and Engineering.
5. Gulen M.F., Uflaz E., Gumus F., Orhan M. and Arslan O. (2025) An integrated SWOT-based interval type-2 fuzzy AHP and TOPSIS methodology for digital transformation strategy selection in maritime safety. Ocean Engineering, 323, p. 120518.
6. IEEE Access (2024). Research on Site Selection of Ship Tank Washing Stations Based on a Biobjective Optimization Model. IEEE Access, 12, pp. 88122-88133.
7. Xu K. (2025). Decision-support frameworks for MCDA method selection and emission abatement technology assessment in the maritime sector. Doctoral Thesis. University of Southampton.
8. Reuckij A.S., Semionichev D.S., Bucanec A.A. Primenyaemye v morskoj praktike metody ocenki riskov [Risk Assessment Methods Used in Maritime Practice] // Transportnoe delo Rossii. — 2025. — № 6. — S. 156-162.
9. Kuznecov A.L., Kirichenko A.V., Sitov A.N. Imitacionnoe modelirovanie dvizheniya sudov po krugovym marshrutam v usloviyah chastichnoj ledovoj provodki [Simulation Modeling of Vessel Movement along Circular Routes under Conditions of Partial Ice Escort] // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. — 2026. — T. 18. — № 3. — S. 382-393. — EDN CWLKUK. — DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-382-393. https://journal.gumrf.ru/jour/article/view/747/538
10. Shurpyak V.K. Primenenie metodov ocenki riska dlya opredeleniya dopustimyh uslovij ledovogo plavaniya [Application of Risk Assessment Methods for Determining Acceptable Ice Navigation Conditions] // Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva. — 2025. — № 81. — S. 12-28. — EDN DEOFTS.

11. Skorohodov D.A., Malygin I.G., Kaminskij V.Yu. Analiz obespecheniya funkcional'noj bezopasnosti morskogo transporta s uchetom ekologicheskih aspektov [Analysis of Functional Safety Assurance of Maritime Transport Considering Environmental Aspects] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. — 2026. — № 1-1(71). — S. 221-229. — DOI 10.37220/MIT.2026.71.1.023. — EDN GATWWM.

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

Кириченко Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой портов и грузовых терминалов, «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: kirichenkoav@gumrf.ru

Aleksandr V. Kirichenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Ports and Cargo Terminals, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: kirichenkoav@gumrf.ru

Туров Дмитрий Евгеньевич, инженер, аспирант, «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

Dmitrii E. Turov, Engineer, Postgraduate Student, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

Шаркова Василиса Павловна, магистрант, «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: sharkovavp@gumrf.ru

Vasilisa P. Sharkova, master's student, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: sharkovavp@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.07.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.07.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 14.08.2026.

Научная статья
УДК 656.61.052:519.872
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.058

Расчёт длительности рейса и численности ледокольного флота при организации перевозок в сложных ледовых условиях

Кузнецов А.Л.[1] thunder1950@yandex.ru, **Кириченко А.В.**[1] kirichenkoav@gumrf.ru,
Вальков В.Е.[2] vlvalkov@yandex.ru, **Шаркова В.П.**[1] sharkovavp@gumrf.ru
[1]Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова,
[2]Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. В статье рассматривается задача определения длительности кругового рейса судов и потребного количества ледоколов для обеспечения экспортных перевозок сжиженного природного газа (СПГ) по восточному участку Северного морского пути. Авторы анализируют логистическую цепь, включающую движение танкеров ледового класса, перевалку груза на плавучие хранилища и ледокольное сопровождение. Предложен расчётный метод на основе теории массового обслуживания, позволяющий оценить число судов и ледоколов при заданных интервалах отправления и времени проводки. Результаты расчётов сопоставлены с данными проектной документации и подтверждают адекватность предложенного подхода. Установлено, что при заданных исходных параметрах транспортной системы длительность кругового рейса составляет 30 суток, что соответствует 12 рейсам в год и требует флота из 21–22 танкеров ледового класса. Показано, что при ледокольном сопровождении на всём протяжении маршрута число ледоколов должно соответствовать числу танкеров, тогда как ограничение проводки восточным сегментом снижает потребность до 8 ледоколов. Для случая организации перевозок караванами получены аналитические соотношения, связывающие интервал отправления судов, размер каравана и продолжительность ледовой проводки с требуемым числом ледоколов. Показано, что в условиях детерминированных параметров метод даёт оценки, совпадающие с практическими данными, однако для учёта случайных флуктуаций рекомендуется переход к имитационному моделированию.
Ключевые слова: Северный морской путь, ледокольная проводка, караваны судов, теория массового обслуживания, транспортная логистика, Арктика, танкеры ледового класса, численность флота
Для цитирования: Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Вальков В.Е., Шаркова В.П. Расчёт длительности рейса и численности ледокольного флота при организации перевозок в сложных ледовых условиях, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 287—292. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.058

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.058

Calculation of voyage duration and icebreaker fleet size for cargo transportation in severe ice conditions

Aleksandr L. Kuznetsov[1] thunder1950@yandex.ru**, Aleksandr V. Kirichenko**[1] kirichenkoav@gumrf.ru,
Vladimir E. Valkov[2] vlvalkov@yandex.ru, **Vasilisa P. Sharkova**[1] sharkovavp@gumrf.ru
[1]Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation
[2]Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The paper addresses the problem of determining the round-trip voyage duration and the required number of icebreakers for LNG exports via the eastern part of the Northern Sea Route. The authors analyse the logistics chain, including ice-class tanker operations, cargo transshipment to floating storage units, and icebreaker escort. A calculation method based on queueing theory is proposed to estimate the required numbers of vessels and icebreakers under given departure intervals and ice transit times. The calculated results are compared with design documentation and confirm the adequacy of the proposed approach. It is established that under the given input parameters of the transport system, the round-trip voyage duration is 30 days, corresponding to 12 voyages per year and requiring a fleet of 21–22 ice-class tankers. It is shown that when icebreaker escort is provided along the entire route the number of icebreakers must match the number of tankers, whereas limiting escort to the eastern segment reduces the requirement to 8 icebreakers. For the case of convoy operations, analytical relationships are obtained linking the departure interval, convoy size, and ice transit duration to the required number of icebreakers. It is shown that under deterministic parameters the method yields estimates consistent with practical data; however, for accounting for random fluctuations, a transition to simulation modelling is recommended.
Keywords: Northern Sea Route, icebreaker escort, ship convoys, queueing theory, transport logistics, Arctic, ice-class tankers, fleet size estimation
For citation: Aleksandr L. Kuznetsov, Aleksandr V. Kirichenko, Vladimir E. Val'kov, Vasilisa P. Sharkova, Calculation of voyage duration and icebreaker fleet size for cargo transportation in severe ice conditions, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 287—292. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.058

© Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Вальков В.Е., Шаркова В.П., 2026

Введение

Развитие транспортной логистики в Арктической зоне Российской Федерации является одним из ключевых приоритетов государственной политики и экономического развития страны. Арктический регион обладает уникальными запасами углеводородного сырья, и его освоение напрямую связано с созданием эффективной и надёжной системы морских перевозок. Особую роль в этом процессе играет Северный морской путь (СМП), который не только обеспечивает внутренние потребности, но и открывает новые экспортные возможности, сокращая расстояние между портами Европы и Азии. В условиях глобального потепления и таяния льдов значение СМП как транспортного коридора неуклонно возрастает, что требует разработки новых методов планирования и управления движением судов в сложной ледовой обстановке [1–4].

Одним из наиболее масштабных проектов в регионе является газовый проект «Арктик СПГ-2», предусматривающий производство 19,8 млн т (46 млн м³) сжиженного природного газа с его последующим экспортом в страны Юго-Восточной Азии. Для вывоза продукции планируется использовать танкеры ледового класса типа «Ямалмакс» (головное судно — «Алексей Косыгин») вместимостью 172 000 м³. Экономическая целесообразность предполагает не прямую доставку конечному потребителю, а накопление груза на плавучем хранилище газа с последующей перевалкой на обычные газовозы.

В предыдущих работах авторов [5–8] был описан общий метод расчёта численности флота, основанный на оценке длительности кругового рейса через время обработки в портах и ходовое время, рассчитанное по средней скорости. Однако такой подход не учитывает влияния ледовых условий, которые могут существенно изменять скорость движения и требовать ледокольного сопровождения. Настоящее исследование посвящено развитию этого метода применительно к восточной части СМП, где ледовая обстановка наиболее сложна. В работе решаются две частные задачи: определение длительности рейса и расчёт необходимого числа ледоколов при организации проводки как отдельных судов, так и караванов.

Методы и материалы

В основе исследования лежит аналитический подход, комбинирующий элементы теории расписаний и теории массового обслуживания (ТМО) [9-11]. Исходными данными служат проектные параметры транспортной системы:

– вместимость танкера — 172 000 м³;

– требуемое количество отправок (судозаходов) — 270 в год;

– время обработки судна в портах отправки и доставки — по 2 суток;

– скорость движения на различных участках маршрута (табл. 1).

Таблица 1

Параметры движения судна по маршруту

	Наименование	Значение	Единицы
Погрузка	Порт отправки	2	сут
Участок 1	Протяженность	960	миль
	Скорость судна	16	узлов
	Время преодоления	2,5	сут
Участок 2	Протяженность	720	миль
	Скорость судна	12	узлов
	Время преодоления	2,5	сут
Участок 3	Протяженность	720	миль
	Скорость судна	10	узлов
	Время преодоления	3,0	сут
Участок 4	Протяженность	720	миль
	Скорость судна	6	узлов
	Время преодоления	5,0	сут
Выгрузка	Порт назначения	2	сут
Участок 4	Протяженность	720	миль
	Скорость судна	6	узлов
	Время преодоления	5,0	сут
Участок 3	Протяженность	720	миль
	Скорость судна	10	узлов
	Время преодоления	3,0	сут
Участок 2	Протяженность	720	миль
	Скорость судна	12	узлов
	Время преодоления	2,5	сут
Участок 1	Протяженность	960	миль
	Скорость судна	16	узлов
	Время преодоления	2,5	сут

На основе этих данных строится график движения одного судна по круговому маршруту (рис. 1). Общее время рейса определяется как сумма стояночного и ходового времени по участкам.



Для заданного грузопотока с интервалом между заходами судов в порт, равным 36 часам (1,5 суток), вычисляется потребное количество судов:

$$N_s = \left\lceil \frac{T_{\text{рейса}}}{t_{\text{инт}}} \right\rceil, \quad (1)$$

где: $T_{\text{рейса}}$ — длительность полного кругового рейса (сут.); $t_{\text{инт}}$ — интервал между отправлениями (сут.).

График движения всего флота представлен на рис. 2. Количество судов, одновременно находящихся на маршруте, определяется числом пересечений вертикальной линии с нитками графика (рис. 3).

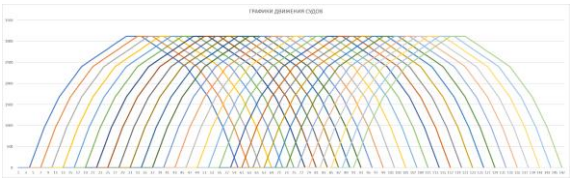


Рис. 2. График движения флота

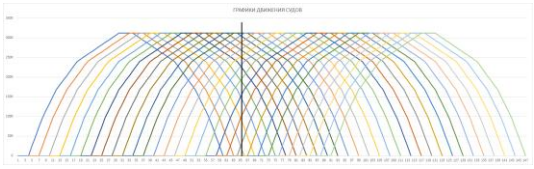


Рис. 3. Количество судов на маршруте в произвольный момент времени

Для случая ледокольного сопровождения на всём протяжении маршрута число ледоколов совпадает с числом танкеров. Если же проводка выполняется только на восточном сегменте, то количество ледоколов определяется пересечением вертикальной линии с границами этого участка (рис. 4).

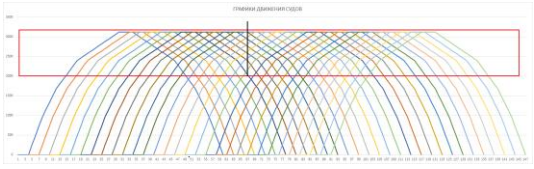


Рис. 4. Количество ледоколов для проводки в восточном сегменте

Для более общего случая — проводки караванов — применяется аппарат теории массового обслуживания. Логистическая цепь представляется как последовательное соединение систем массового обслуживания с ожиданием (рис. 5).

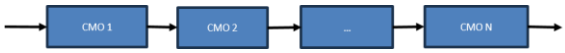


Рис. 5. Цепь связанных СМО

Вводится понятие «приведённой плотности потока заявок»:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{t_{об}}{t_{инт}} \quad (2)$$

где: $\lambda = 1/t_{инт}$ — плотность потока поступления заявок; $\mu = 1/t_{об}$ — плотность потока освобождения; $t_{об}$ — среднее время обработки заявки; $t_{инт}$ — средний интервал между заявками.

Условие стационарности СМО с ожиданием: $\alpha < n$, где n — число каналов обслуживания.

Для системы с караванами заявкой считается группа судов, m — размер каравана, а интервал между заявками равен $m \cdot t_{инт}$. Время обработки заявки (движение в караване) равно $t_{лед}$. Тогда количество караванов n_k определяется как:

$$n_k = \left\lceil \frac{t_{лед}}{m \cdot t_{инт}} \right\rceil \quad (3)$$

Если каналом обслуживания является ледокол, а один караван требует одного ледокола, но проводка осуществляется туда и обратно, то:

$$n_{лед} = \left\lceil \frac{2 \cdot t_{лед}}{m \cdot t_{инт}} \right\rceil \quad (4)$$

Полученные оценки иллюстрируются на рис. 6.

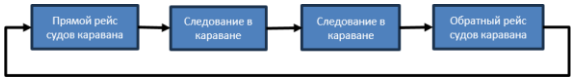


Рис. 6. Цепь морской транспортировки с учётом каравана ледовой проводки

Результаты

На основе проектных данных было установлено, что общее время кругового рейса одного судна составляет 30 суток, что позволяет выполнить 12 рейсов в год. Для обеспечения 270 судозаходов требуется флот из 21–22 судов.

При ледокольной проводке на всём протяжении маршрута число ледоколов соответствует числу танкеров. При проводке только в восточном сегменте, как показано на рис. 4, потребность в ледоколах снижается до 8 единиц. Эти расчётные данные полностью совпадают с показателями, указанными в документах Минтранса и Правительства РФ, что подтверждает состоятельность упрощённого подхода.

Для случая караванной проводки проведены расчёты для примера с параметрами: $t_{инт} = 2$ суток; $m = 3$ судна; $t_{лед} = 12$ суток. Тогда интервал между заявками: $m \cdot t_{инт} = 6$ суток.

Количество караванов определяется как:

$$n_k = \left\lceil \frac{12}{6} \right\rceil = 2 \quad (5)$$

Требуемое число ледоколов:

$$n_{лед} = \left\lceil \frac{2 \cdot 12}{6} \right\rceil = 4 \quad (6)$$

Этот результат графически интерпретируется на рис. 7.

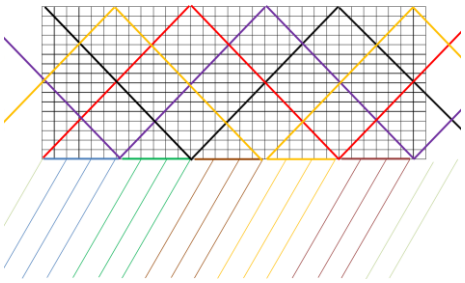


Рис. 7. Караваны и ледоколы в ледовой проводке

Таким образом, для проводки трёх судов в составе каравана на участке длительностью 12 суток при интервале отправления 2 суток требуется 4 ледокола.

Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют, что использование детерминированных моделей на базе теории массового обслуживания позволяет получать оценки численности флота, близкие к практическим данным. Это особенно важно на начальных этапах проектирования, когда требуется оперативно оценить необходимые ресурсы.

Однако предложенный метод имеет ограничения. Во-первых, он неявно использует граничное условие стационарности ($\alpha = n$), которое в реальных условиях может нарушаться из-за случайных флуктуаций (погодные условия, изменчивость ледовой обстановки, задержки в портах). Это может привести к неограниченному росту очередей и сбоям в работе системы.

Во-вторых, замена реальных распределений времени обслуживания и интервалов поступления детерминированными величинами или

стандартными законами ТМО может оказаться слишком грубой, особенно для систем с жёсткими временными ограничениями, как в случае с непрерывным производством СПГ.

В связи с этим авторы рекомендуют на последующих этапах проектирования переходить к объектно-ориентированному имитационному моделированию. Такая модель должна стать цифровым двойником транспортной системы, непрерывно уточняться по мере поступления новых данных и учитывать стохастический характер процессов. Предложенный в данной работе метод может служить базовым ядром для такой модели на начальных этапах.

Заключение

В работе разработан и апробирован расчётно-аналитический метод определения длительности рейса и потребного количества ледоколов при организации перевозок по восточной части Северного морского пути. На примере проекта «Арктик СПГ-2» показано, что упрощённые модели дают результаты, согласующиеся с официальными проектными данными, и могут быть использованы для предварительной оценки потребностей в тоннаже и ледокольном обеспечении.

Для общего случая караванной проводки предложены формулы, позволяющие связать интервал отправления судов, размер каравана, время ледовой проводки и число ледоколов. Показано, что при детерминированных параметрах система может быть рассчитана с использованием порогового условия стационарности.

Вместе с тем, для учёта реальной неопределённости и избежания сбоев в работе системы рекомендуется развитие подхода в направлении имитационного моделирования. Предложенная методика может служить начальной версией такой модели, обеспечивая преемственность и адекватность на ранних этапах проектирования транспортных систем в Арктике.

Литература

1. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. Утв. Указом Президента Российской Федерации от 26.10.2020 № 645. [Электронный ресурс]. — URL: https://docs.cntd.ru/document/566091182.
2. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года (с изменениями на 21 февраля 2023 года). Утв. Указом Президента Российской Федерации от 05.05.2020 № 164. [Электронный ресурс]. — URL: https://docs.cntd.ru/document/564371920#6560IO.
3. Государственная программа Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями). Утв. Постановлением Правительства РФ от 30.03.2021 № 484. [Электронный ресурс]. — URL: https://base.garant.ru/400534977/.
4. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 № 3363-р. [Электронный ресурс]. — URL: https://docs.cntd.ru/document/727294161?marker=65A0IQ.
5. Кузнецов, А. Л. Логистические технологии «Low-Steaming» и «Stock on Wheel» в цепях морской поставки углеводородов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Н. Ситов // Транспортное дело России. — 2026. — № 2. — С. 234-237.
6. Кузнецов, А. Л. Квазистационарный расчёт параметров терминальных пунктов пропуска при значительной неравномерности потока заявок / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // Транспортное дело России. — 2025. — № 3. — С. 232-235.
7. Базовая графо-теоретическая модель судоходных маршрутов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Е. Вальков, В. Ю. Грызлов // Транспортное дело России. — 2025. — № 4. — С. 218-220.
8. Кузнецов, А. Л. Исполнимая нотация процессного управления на водном транспорте / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2025. — Т. 17, № 6. — С. 884-893. DOI 10.21821/2309-5180-2025-17-6-884-893.
9. Аналитическая симуляционная модель произвольной системы массового обслуживания / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 1-1(59). — С. 278-281. DOI 10.37220/MIT.2023.59.1.037.
10. Таровик О.В. Обзор развития теории проектирования судов и обсуждение перспектив создания цифровых проектных решений / О.В. Таровик // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — No 79. — С. 124 — 136. — EDN PELJHW.
11. Каминский, В. Ю. Применение интеллектуальных систем поддержки судоводителя для оптимизации процесса аварийного торможения морского судна, основанного на принципах циркуляции / В. Ю. Каминский, Д. А. Скороходов // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – № 3-1(65). – С. 287-293. – DOI 10.37220/MIT.2024.653.052. – EDN FTRRRO.
12. Майоров, Н. Н. Исследование загруженности причалов морского пассажирского порта на основе имитационной модели с учетом региональных особенностей и стохастического влияния внешней среды /Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов, М. Р. Язвенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — No 6. — С. 801–815. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-6-801-815. — EDN CFLCLU.
13. Скороходов, Д. А. Принципы построения системы информационной поддержки для принятия решения в аварийных ситуациях / Д. А. Скороходов, А. Л. Стариченков // Морские интеллектуальные технологии. – 2009. – № 1(3). – С. 48-56. – EDN KPSVXR.

References

1. Strategiya razvitiya Arkticheskoj zony Rossijskoj Federacii i obespecheniya nacional'noj bezopasnosti na period do 2035 goda [Strategy for the Development of the Arctic Zone of the Russian Federation and Ensuring National Security for the Period up to 2035]. Utv. Ukazom Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 26.10.2020 № 645. [Elektronnyj resurs]. — URL: https://docs.cntd.ru/document/566091182.
2. Osnovy gosudarstvennoj politiki Rossijskoj Federacii v Arktike na period do 2035 goda [Fundamentals of the State Policy of the Russian Federation in the Arctic for the Period up to 2035]. Utv. Ukazom Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 05.05.2020 № 164 (s izmeneniyami na 21 fevralya 2023 goda). [Elektronnyj resurs]. — URL: https://docs.cntd.ru/document/564371920#6560IO.
3. Gosudarstvennaya programma Rossijskoj Federacii «Social'no-ekonomicheskoe razvitie Arkticheskoj zony Rossijskoj Federacii» [State Program of the Russian Federation "Socio-Economic Development of the Arctic Zone of the Russian Federation"] (s izmeneniyami i dopolneniyami). Utv. Postanovleniem Pravitel'stva RF ot 30.03.2021 № 484. [Elektronnyj resurs]. — URL: https://base.garant.ru/400534977/.
4. Transportnaya strategiya Rossijskoj Federacii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda [Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a Forecast for the Period up to 2035]. Utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 27.11.2021 № 3363-r. [Elektronnyj resurs]. — URL: https://docs.cntd.ru/document/727294161?marker=65A0IQ.
5. Kuznecov A.L., Kirichenko A.V., Sitov A.N. Logisticheskie tekhnologii «Low-Steaming» i «Stock on Wheel» v cepyah morskoj postavki uglevodorodov [Logistic Technologies "Low-Steaming" and "Stock on Wheel" in Hydrocarbon Maritime Supply Chains]. Transportnoe delo Rossii. — 2026. — № 2. — S. 234-237.
6. Kuznecov A.L., Kirichenko A.V., Semenov A.D. Kvazistacionarnyj raschet parametrov terminal'nyh punktov propuska pri znachitel'noj neravnomernosti potoka zayavok [Quasi-Stationary Calculation of Terminal Checkpoint Parameters with Significant Irregularity of Request Flow]. Transportnoe delo Rossii. — 2025. — № 3. — S. 232-235.
7. Bazovaya grafo-teoreticheskaya model' sudohodnyh marshrutov [Basic Graph-Theoretical Model of Shipping Routes] / A.L. Kuznecov, A.V. Kirichenko, V.E. Val'kov, V.Yu. Gryzlov // Transportnoe delo Rossii. — 2025. — № 4. — S. 218-220.
8. Kuznecov A.L., Ispolnimaya notaciya processnogo upravleniya na vodnom transporte [Executable Process Management Notation in Water Transport] / A.L. Kuznecov, A.V. Kirichenko // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. — 2025. — T. 17. — № 6. — S. 884-893. DOI 10.21821/2309-5180-2025-17-6-884-893.
9. Kuznecov A.L., Kirichenko A.V., Semenov A.D. Analiticheskaya simulyacionnaya model' proizvol'noj sistemy massovogo obsluzhivaniya [Analytical Simulation Model of an Arbitrary Queueing System] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. — 2023. — № 1-1(59). — S. 278-281. DOI 10.37220/MIT.2023.59.1.037.
10. Tarovik O.V. Obzor razvitiya teorii proektirovaniya sudov i obsuzhdenie perspektiv sozdaniya cifrovyh proektnyh reshenij [Review of the Development of Ship Design Theory and Discussion of Prospects for Creating Digital Design Solutions] // Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva. — 2025. — № 79. — S. 124-136. — EDN PELJHW.
11. Kaminskij V.Yu., Skorohodov D.A. Primenenie intellektual'nyh sistem podderzhki sudovoditelya dlya optimizacii processa avarijnogo tormozheniya morskogo sudna, osnovannogo na principah cirkulyacii [Application of Intelligent Shipmaster Support Systems for Optimization of the Emergency Braking Process of a Marine Vessel Based on Circulation Principles] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. — 2024. — № 3-1(65). — S. 287-293. — DOI 10.37220/MIT.2024.653.052. — EDN FTRRRO.
12. Majorov N.N., Fetisov V.A., Yazvenko M.R. Issledovanie zagruzhennosti prichalov morskogo passazhirskogo porta na osnove imitacionnoj modeli s uchetom regional'nyh osobennostej i stohasticheskogo vliyaniya vneshnej sredy [Study of Berth Occupancy of a Sea Passenger Port Based on a Simulation Model Considering Regional Features and Stochastic Influence of the External Environment] // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. — 2025. — T. 17. — № 6. — S. 801-815. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-6-801-815. — EDN CFLCLU.
13. Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Principy postroeniya sistemy informacionnoj podderzhki dlya prinyatiya resheniya v avarijnyh situaciyah [Principles of Building an Information Support System for Decision-Making in Emergency Situations] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. — 2009. — № 1(3). — S. 48-56. — EDN KPSVXR.

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

Кузнецов Александр Львович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры портов и грузовых терминалов, «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: thunder1950@yandex.ru

Aleksandr L. Kuznetsov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Ports and Cargo Terminals, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: thunder1950@yandex.ru

Кириченко Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой портов и грузовых терминалов, «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: kirichenkoav@gumrf.ru

Aleksandr V. Kirichenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Ports and Cargo Terminals, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: kirichenkoav@gumrf.ru

Вальков Владимир Евгеньевич, доцент, «Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет», 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52б, e-mail: vlvalkov@yandex.ru

Vladimir E. Valkov, assistant professor, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52b, Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: vlvalkov@yandex.ru

Шаркова Василиса Павловна, магистрант, «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: sharkovavp@gumrf.ru

Vasilisa P. Sharkova, master's student, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: sharkovavp@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.07.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.07.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 11.08.2026.

Научная статья
УДК 656.6
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.059

Определение состава контейнерного флота для транспортных маршрутов Российской Федерации

Кузнецов А.Л.[1] thunder1950@yandex.ru, **Кириченко А.В.**[1] kirichenkoav@gumrf.ru,
Шагин Н.С.[1] shaginnikita@mail.ru, **Шаркова В.П.**[1] sharkovavp@gumrf.ru
[1]Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

Аннотация. Рассмотрев тенденции роста вместимости контейнерных судов на мировом уровне, необходимо произвести анализ факторов, влияющих на определение состава контейнерного флота применительно к национальной специфике и маршрутам. Помимо факторов, которые влияют на мировую контейнерную отрасль в целом, существуют факторы, влияющие непосредственно на транспортные маршруты Российской Федерации, учитывающие как географическую составляющую, так и существующие возможности на уровне государства и бизнеса. Экономика РФ не оправилась от последствий COVID-19, как против неё ввели огромное количество санкций, фактически отрезав от мировой транспортной и банковской систем. Это вынудило государство и бизнес искать пути решения сложившейся ситуации, а также пересматривать в краткосрочной и долгосрочной перспективах свои стратегии, в том числе и по отношению как к контейнерному флоту, так и к маршрутизации потоков в целом. Достижение синергетического эффекта возможно лишь при сбалансированном использовании всех имеющихся ресурсов, а также поиске узких сечений, которые требуется грамотно модернизировать, в соответствии с имеющимися возможностями.
Ключевые слова: транспортные маршруты, узкие сечения, грузооборот портов РФ, контейнерный флот, пропускная способность портов, портовая инфраструктура, Северный морской путь, судостроение, импортозамещение, санкционные ограничения
Для цитирования: Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Шагин Н.С., Шаркова В.П. Определение состава контейнерного флота для транспортных маршрутов Российской Федерации, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 293—303. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.059

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.059

Determination of the container fleet composition for transport routes of the Russian Federation

Aleksandr L. Kuznetsov[1] thunder1950@yandex.ru, **Aleksandr V. Kirichenko**[1] kirichenkoav@gumrf.ru,
Nikita S. Shagin[1] shaginnikita@mail.ru, **Vasilisa P. Sharkova**[1] sharkovavp@gumrf.ru
[1]Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Russian Federation

Abstract. Having considered the trends in the growth of container ship capacity at the global level, it is necessary to analyze the factors influencing the determination of the composition of the container fleet in relation to national specifics and routes. In addition to the factors that influence the global container industry as a whole, there are factors that directly influence the transport routes of the Russian Federation, taking into account both geographical factors and existing opportunities at the state and business levels. The Russian economy has not yet recovered from the consequences of COVID-19, as a huge number of sanctions have been imposed against it, effectively cutting it off from the global transport and banking system. This forced the state and business to look for ways to resolve the current situation, as well as to reconsider their strategies in the short and long term, including in relation to both the container fleet and the routing of flows in general. Achieving a synergistic effect is possible only with a balanced use of all available resources, as well as a search for narrow sections that need to be intelligently modernized, in accordance with existing capabilities.
Keywords: transport routes, narrow sections, cargo turnover of Russian ports, container fleet, port capacity, port infrastructure, Northern Sea Route, shipbuilding, import substitution, sanctions restrictions
For citation: Aleksandr L. Kuznetsov, Aleksandr V. Kirichenko, Nikita S. Shagin, Vasilisa P. Sharkova, Determination of the container fleet composition for transport routes of the Russian Federation, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 293—303. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.059

Введение

После введения против нашей страны самого большого числа санкций за всю историю, морская транспортная отрасль столкнулась с рядом сложностей. Почти все зарубежные транспортные компании покинули рынок, оставшиеся ввели жёсткие ограничения по перевозимым грузам, во избежание попадания под вторичные санкции. С одной стороны, в очередной раз был подтверждён тезис о том, что транспорт можно использовать как оружие в современных войнах, с другой стороны это дало национальным экспедиторам и судовладельцам возможность, без жёсткой конкуренции со стороны мировых контейнерных гигантов, организовать свои небольшие контейнерные линии, а существующим линиям привлечь дополнительные грузопотоки. Нельзя не

© Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Шагин Н.С., Шаркова В.П. 2026

отметить тот факт, что на пути становления национальные операторы вынуждены брать суда в тайм-чартер, рейсовый чартер, а не покупать суда из-за недостатка и условий финансирования. Окрепшие национальные компании постепенно улучшают свой сервис, конкурируя между собой и с небольшим кругом китайских судовладельцев. Санкции против банковского сектора бесспорно мешают активному развитию, но дружественные страны помогают в той или иной мере решать данную проблему. Грузопотоки несколько снизились, но за рубежом начинают понимать всю бесперспективность санкционного давления и начинают торговать с РФ через страны-партнёры, даже несмотря на банковские издержки, удорожание логистики из-за необходимости перепродаж и изменения маршрутов. Для контейнерной линии основным инструментом оказания транспортной услуги являются флот судов — контейнеровозы и непосредственно контейнеры.

Санкции против нашей страны отсекли нас от всех основных мировых судостроительных верфей, оставив узкий вторичный рынок контейнеровозов и возможность чартера судов, напрямую или через страны-партнёры. Единственная верфь — ССК «Звезда», занята постройкой судов для перевозки нефти и СПГ и перегружена заказами. Китайские партнёры на первых годах выручали нас, закрыв потребность в контейнерах, но из-за несбалансированности импорта и экспорта стоимость контейнеров в Китае растёт, поэтому анализ формирования контейнерных парков также требует отдельного глубокого анализа и проработки. В данной статье принято предположение о виртуальном балансе импорта и экспорта, поскольку целью является анализ пропускных способностей национальных транспортных артерий и поиск узких сечений на основных направлениях.

Методы и материалы

Рассматривая статистические данные, можно видеть, что грузооборот портов РФ неуклонно растёт. И растёт как в импортном, так и в экспортном направлениях. Результаты сравнения 2024 и 2023 года приведены в табл. 1.

Таблица 1

Контейнерооборот портов РФ

Контейнерооборот портов РФ	млн ДФЭ	% относительно 2023 года
Импорт	2,349	+15,2
Экспорт	1,958	+13,5
Транзит	0,034	–69,6
Каботаж	1,249	+15,3
Всего	**5,591**	**+12,7**

На рис. 1 представлено распределение контейнерооборота портов РФ по направлениям.

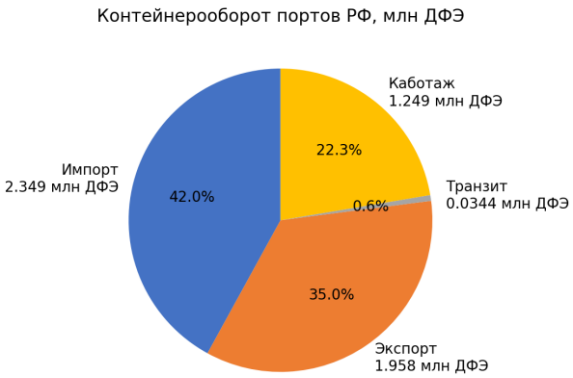


Рис. 1. Распределение контейнерооборота по направлениям

Если до введения санкций достаточно большая часть груза шла через порты сопредельных государств, то сейчас наша транспортная отрасль может надеяться исключительно на национальные порты. Готова ли наша инфраструктура к такому количеству груза или нет — вот тот вопрос, который следует рассмотреть детально. На первоначальном этапе необходимо понимать, какие порты мы можем задействовать и какие существуют ограничения у данных портов. Речь не только о производственных мощностях, речь о географическом положении, глубинах и общих характеристиках портов. Если брать деление ФГУП «Росморпорт», в управлении которого находятся все порты РФ, и придерживаться бассейнового деления, то бассейнами, подлежащими рассмотрению, будут — Балтийский, Арктический, Дальневосточный, Азово-Черноморский и Каспийский.

Основными портами Балтийского бассейна являются — Большой порт Санкт-Петербург, Калининград и порт Усть-Луга. Калининград находится в окружении недружественных стран и вряд ли подходит для роли входных ворот. В любом случае необходимо отметить, что его пропускная способность составляет 802 тыс. ДФЭ в год. Максимальные габариты судна для порта составляют: длина — 200 м, ширина — 30 м, осадка — 9,6 м. Максимальный размер судна соответствует ячеистому контейнеровозу с вместимостью до 2500 ДФЭ. Пропускная способность Большого порта Санкт-Петербурга составляет 4312,6 тыс. ДФЭ в год, а максимальные габариты судна: длина — 347 м, ширина — 50 м, осадка — 13,0 м. На Усть-Лужском контейнерном терминале пропускная способность скромнее — 440 тыс. ДФЭ в год, но суда он может принимать больше: длина — 320 м, ширина — 50 м, осадка — 15 м. Несмотря на заявленные возможности, реальные размерения заходящих судов не превышают типоразмера Панамакс Макс с вместимостью 3400–4500 ДФЭ и осадкой до 12,4 метра.

Во всех трёх портах осуществляется круглогодичная навигация. Исходя из классификации терминалов по пропускной способности, Большой порт Санкт-Петербурга и порт Калининграда являются большими, а порт Усть-Луги — средним контейнерным терминалом. Нельзя не отметить, что, как показала практика, перекрытие Суэцкого канала может надолго парализовать работу данных портов, а перекрытие может случиться не только из-за аварий и катастроф, а из-за действий недружественных стран и/или военных действий на Ближнем Востоке. Путь же в обход африканского континента критично увеличивает сроки и стоимость перевозки.

К Арктическому бассейну относятся два основных порта — это порт Мурманск и порт Архангельск. Период навигации в обоих портах с учётом ледокольной поддержки — круглогодичный. Порт Архангельска при пропускной способности в 75 тыс. ДФЭ в год относится к малым контейнерным терминалам, а порт Мурманска — к средним с пропускной способностью 390,9 тыс. ДФЭ в год. Максимальные размерения судов для порта Мурманска не предусмотрены, в то время как для порта Архангельска они составляют: длина — 190 м, ширина — 30 м, осадка — 9,2 м. Данные размерения соответствуют полностью ячеистому контейнеровозу с вместимостью 1000–2500 ДФЭ. Использование обоих портов в контейнерных линейных перевозках предполагает приём судов с СМП и наличие усиленного ледового класса. Хождение по СМП возможно только при согласовании ширины судна с шириной ледокола, ведущего караван, что также накладывает свои ограничения. Для полноценного использования СМП требуется постройка судов с классом ARC7, что соответствует практически самостоятельному ледоколу. В сложившихся реалиях отсутствия мощностей на верфях, а также банального отсутствия серьёзного капитала у частных инвесторов, постройка контейнерных судов такого класса выглядит без поддержки государства просто нереальной. Стоимость класса ARC4 на 40% выше стоимости обычного судна, а стоимость ARC7 можно только предположить. Перспектива постройки судов с малой провозной способностью и усиленным ледовым классом предполагает конкретный проект с гарантированной грузовой базой на весь срок окупаемости проекта. Китайские партнёры и российские инвесторы пытаются проработать этот маршрут, запуская суда по СМП с заходом в порт Архангельска, но дальнейший маршрут лежит в порт Санкт-Петербурга. Например, компания NewNew Shipping Line планирует осуществлять регулярные перевозки в 2025 году на этом плече. Но речь идёт не о круглогодичной линии, а только в период навигации, когда льды соответствуют возможностям флота компании.

Порты Владивостока, Восточного и Находки относятся к Дальневосточному бассейну с круглогодичной навигацией. Пропускная способность порта Владивосток составляет 951,17 тыс. ДФЭ в год, порта Восточный — 699,5 тыс. ДФЭ в год, а Находки всего 97,5 тыс. ДФЭ в год. Владивосток и Восточный относятся к большим контейнерным терминалам, а Находка — к малым. Владивосток лимитирован размерениями: длина — 400 м, ширина — 48,2 м, осадка — 18 метров, что соответствует классу Новый Панамакс с вместимостью 12500 ДФЭ. В Восточном максимальная длина составляет 400 м, ширина — 59 м, а осадка — 17 метров, что соответствует ULCS — ультрабольшому контейнерному судну с вместимостью 18000—21000 ДФЭ. Из-за географической близости к нашим основным зарубежным партнёрам и из-за отсутствия ограничивающих факторов Владивосток и Восточный приняли на себя основную нагрузку в последние три года.

Основной точкой Азово-Черноморского бассейна является порт Новороссийска с пропускной способностью в 1114,0 тыс. ДФЭ в год, что по классификации соответствует большому контейнерному терминалу. Допустимые размерения судов в порту Новороссийска составляют: длина — 295,2 м, ширина — 45,04 м, осадка — 13,1 метра, что соответствует классу Панамакс I с вместимостью 4000–6000 ДФЭ. Необходимо отметить, что заход в Азово-Черноморский бассейн осуществляется через проливы Босфор и Дарданеллы, что также вносит неопределённость, так как эти проливы контролируются недружественным военным блоком.

Проход через Каспий, что является частью коридора Север—Юг, возможен через два порта — порт Махачкала и порт Астрахань. Оба терминала относятся к малым контейнерным терминалам. У Махачкалы пропускная способность всего 50 тыс. ДФЭ в год, а у Астрахани — 23,4 тыс. ДФЭ в год. Максимальные габариты судов для Махачкалы: длина — 150 м, ширина — 30 м, осадка — 4,5 м, для Астрахани: длина — 150 м, ширина — 20 м, осадка — 4,2 м. Данные размерения соответствуют крайне небольшим контейнеровозам вместимостью до 500 ДФЭ.

Согласно отчёту Морцентр-ТЭК, в 2024 году: Балтийский бассейн перегрузил 1,635 млн ДФЭ (+34,5% по отношению к 2023 году), порт Мурманска перегрузил 58,9 тыс. ДФЭ (рост на 17,9%), Архангельск перегрузил 46,9 тыс. ДФЭ (+44,8%), Дальневосточный бассейн перегрузил 2,687 млн ДФЭ (+4,6% относительно 2023 года), порт Новороссийска увеличил показатели на 6,5% до 1,066 млн ДФЭ. Каспийский бассейн перегрузил всего 8,7 тыс. ДФЭ — единственный бассейн, показавший отрицательную динамику в 13,1% по отношению к 2023 году.

Из отчётов аналитического агентства SeaLogic, находящихся в открытом доступе, видно провозную способность основных линий, работающих на рассматриваемых маршрутах. Сравнивая показатели, можно сказать, что после 3 квартала 2023 года провозная способность флота падала до 3 квартала 2024 года, но начиная с третьего квартала начала плавно расти вплоть до текущего момента. На первый квартал 2025 года общая провозная способность флота на Санкт-Петербург, Новороссийск и Владивосток составляет 202,7 тыс. ДФЭ в месяц, или 2433 тыс. ДФЭ в год. Доля рынка в % занимаемая основными представителями рынка представлена на рис. 2.

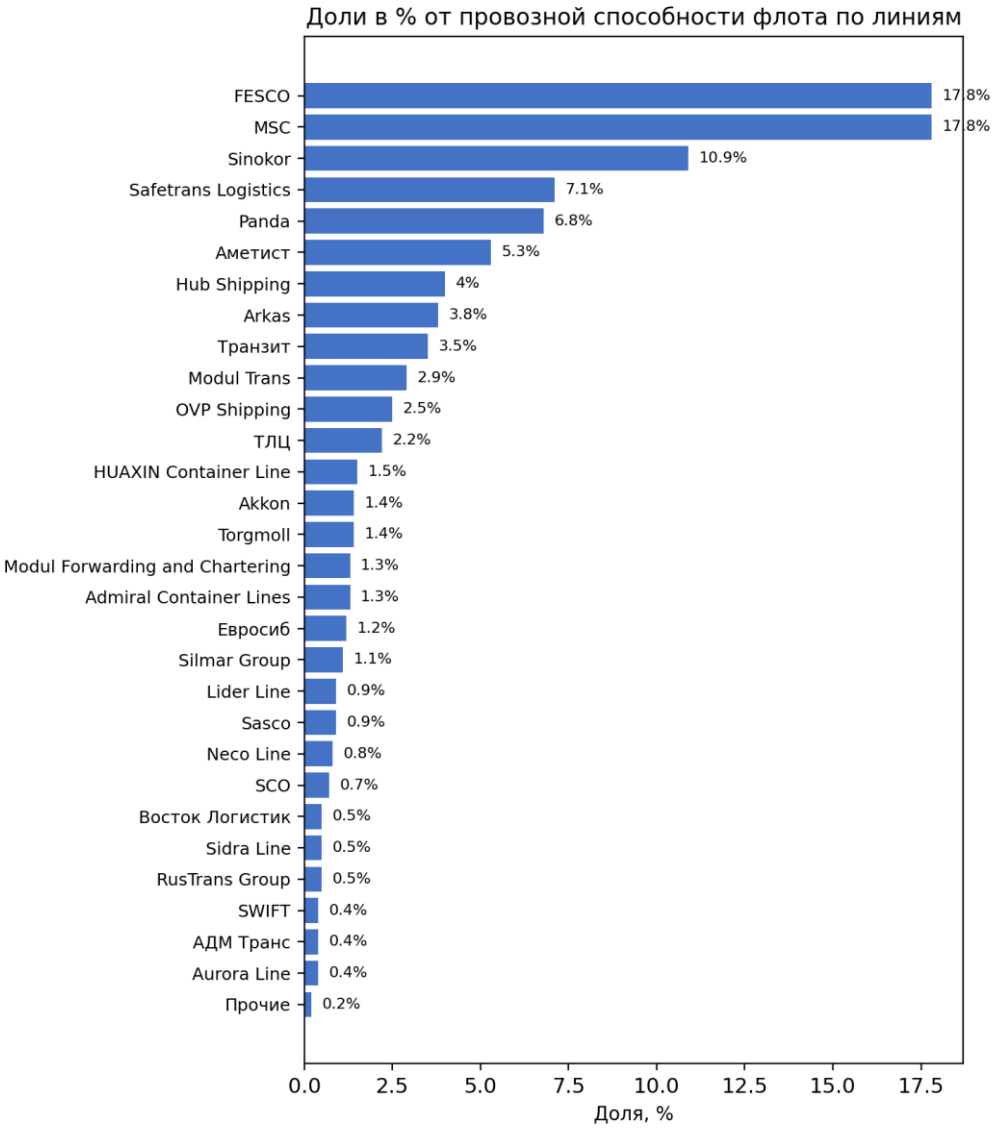


Рис. 2. Доли в % от провозной способности флота по линиям

Провозная способность контейнерных линий на Санкт-Петербург представлена в табл. 2.

Таблица 2

Провозная способность контейнерных линий на Санкт-Петербург

Компания	**тыс. ДФЭ/мес.**	**тыс. ДФЭ/год**
MSC	18714	224568
Safetrans Logistics	5779	69348
Hub Shipping	5046	60552
ТЛЦ	3056	36672
FESCO	2715	32580
Modul Forwarding and Chartering	2670	32040
АДМ Транс	821	9852
Torgmoll	800	9600
Aurora Line	712	8544
OVP Shipping	521	6252
Итого	**40834**	**490008**

Доля рынка между компаниями на этом направлении представлена на рис. 3.



Рис. 3. Доли в % от провозной способности флота по линиям на Санкт-Петербурге

Провозная способность контейнерных линий на Новороссийск представлена в табл. 3.

Таблица 3

Провозная способность контейнерных линий на Новороссийск

Компания	тыс. ДФЭ/мес.	тыс. ДФЭ/год
MSC	13023	156276
Аметист	10802	129624
Arkas	7598	91176
Modul Trans	5887	70644
Safetrans Logistics	5853	70236
OVP Shipping	3404	40848
Akkon	2933	35196
Admiral Container Lines	2582	30984
Silmar Group	2254	27048
Lider Line	1918	23016
Hub Shipping	1719	20628
Sidra Line	1044	12528
FESCO	695	8340
Прочие	405	4860
Итого	**60117**	**721404**

Распределение доли рынка между линиями на этом направлении представлено на рис. 4.

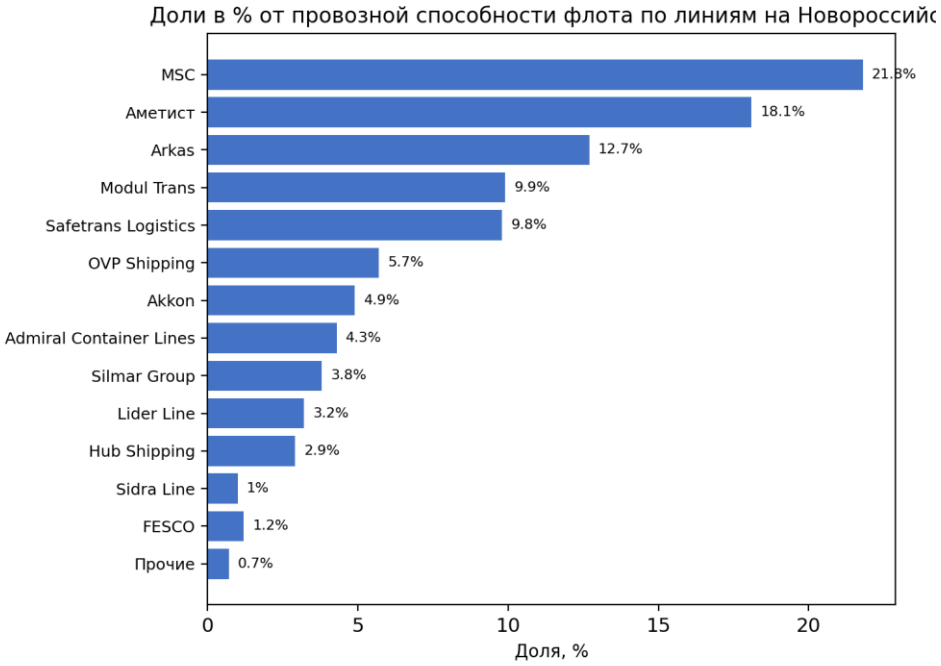


Рис. 4. Доли в % от провозной способности флота по линиям на Новороссийск

Провозная способность контейнерных линий на основные порты Дальневосточного бассейна представлена в табл. 4.

Таблица 4

Провозная способность контейнерных линий на порты Дальневосточного бассейна

Компания	тыс. ДФЭ/мес.	тыс. ДФЭ/год
FESCO	32631	391572
Sinokor	22002	264024
Panda	13860	166320
Транзит	7026	84312
MSC	4285	51420
HUAXIN Container Line	2941	35292
Safetrans Logistics	2733	32796
Евросиб	2367	28404
Torgmoll	2133	25596
Sasco	1896	22752
Neco Line	1684	20208
SCO	1488	17856
ТЛЦ	1418	17016
Hub Shipping	1351	16212
OVP Shipping	1173	14076
Восток Логистик	1079	12948
RusTrans Group	1000	12000
SWIFT	867	10404
Итого	**101934**	**1223208**

Распределение долей представлено на рис. 5.

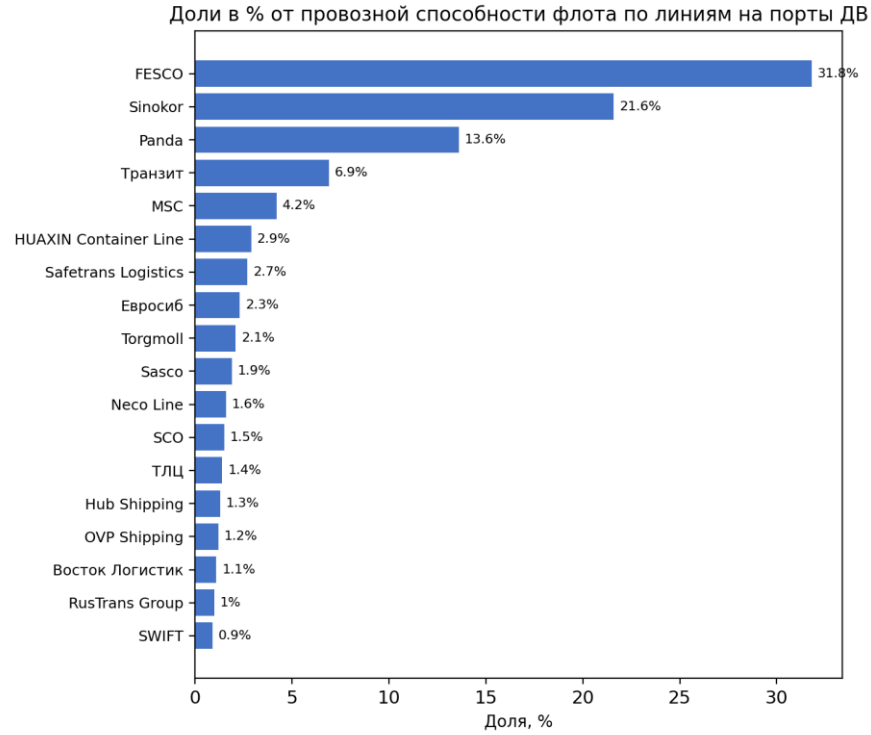


Рис. 5. Доли в % от провозной способности флота по линиям на порты ДВ

Судя по географии охвата, многие линии считают верным распределение флота по направлениям в соответствии с изменяющимися грузопотоками и обстановкой, обладая возможностью перебросить избыток тоннажа на тот или иной маршрут в оперативном режиме. Но для этого необходимо подобрать флот таким образом, чтобы была такая техническая возможность. Где-то судно не пройдёт по осадке, где-то необходим ледовый класс, на длинном маршруте судно меньшего размера подвержено большим опасностям, нежели более крупное. Суммируя всю полученную информацию, видится очевидным, что полностью ячеистый контейнеровоз вместимостью до 2500 ДФЭ является наиболее подходящим для наших транспортных маршрутов. Возможно, что с появлением мировой стабильности наша отрасль придёт к формированию маршрутов с лояльными транзитными странами и использованию более крупных судов, но сейчас это видится достаточно рискованным мероприятием с точки зрения наличия постоянной грузовой базы. Небольшие контейнеровозы быстрее обрабатываются в порту, поступление груза на склад терминала осуществляется плавно, легче найти груз и контейнеры на судно такого размера. К сожалению, наше судостроение не готово справиться с постройкой судов такого размера, поэтому пока приходится ориентироваться на зарубежные верфи. Нет ни мощностей на верфях, ни опыта в постройке ячеистых контейнеровозов. Новости судостроения сообщают о планах постройки 21 ячеистого контейнеровоза собственной разработки с вместимостью 530 ДФЭ для Каспийского бассейна до 2027 года на базе АО «Судостроительный завод «Лотос».

Фактические данные говорят о том, что порт Новороссийска при плановой загрузке в 1114 тыс. ДФЭ в год перевалил 1066 тыс. ДФЭ за год, а провозная способность линий на данный момент составляет 1433 тыс. ДФЭ в год, следовательно, мы видим избыточную провозную способность почти в 319 тыс. ДФЭ в год на этом плече. Большой порт Санкт-Петербурга при плановой мощности в 4312 тыс. ДФЭ перевалил всего 1374 тыс. ДФЭ, и

провозная способность флота снижается до 980 тыс. ДФЭ в год. Это говорит о высоких рисках на данном маршруте, длительном транзитном времени, а также иных факторах риска. Порт Мурманска, рассчитанный на 390 тыс. ДФЭ, перевалил всего 58,9 тыс. ДФЭ, но провозную способность в навигацию планируют увеличить до 360 тыс. ДФЭ — получится ли это или нет, можно будет увидеть в статистике следующего года. Порты Владивостока и Восточного, включая терминалы ВМПП, ВМРП и Пасифик Лоджистикс, готовые принять 2262 тыс. ДФЭ в год, перевалили 2192 тыс. ДФЭ. На этом плече стоит флот с провозной способностью 2447 тыс. ДФЭ, конкурируя между собой. Ответить на вопрос, почему часть терминалов недогружена, а часть работает на пределе, можно, проанализировав наземную инфраструктуру существующих маршрутов.

Обсуждение

Контейнерные терминалы представляют собой сложный объект, который включает в себя причалы, перегружатели, склады накопления, зону таможенного контроля, зону выдачи на автотранспорт и зону выдачи на железную дорогу и другие элементы. К сожалению, не все терминалы имеют возможность грузиться напрямую на ж.д., поэтому отправка по ж.д. осуществляется с тыловых терминалов, что сказывается на скорости и стоимости перевалки. Для некоторых терминалов, у которых есть мощности, но не хватает места на складах, начинает применяться технология сухого порта, но эта технология приводит к дополнительному времени и затратам. Для Большого порта Санкт-Петербург основным потребителем транспортных услуг является г. Москва, что даёт возможность широкого применения автотранспорта для вывоза из порта, и лишь небольшая часть контейнерных грузов идёт через ст. Автово и ст. Новый порт. Через порт Новороссийска большая часть грузов также идёт на г. Москву и регионы Кубани, а ж.д. ветки ограничены туннелями с низкой пропускной способностью и высоким пассажирским трафиком. Порт Мурманска соединён однопутной железной дорогой, и маршрут идёт через Санкт-Петербург, что, при прочих равных, даёт длительное время прохождения поезда до г. Москва. И в данном случае мы говорим только о временных затратах, а есть ещё: затраты по приёмке на станции, подаче вагонов, раскредитации контейнера на станции назначения, также встаёт вопрос о сроках использования и месте сдачи порожнего контейнера, что также является немаловажным. Порты Дальнего Востока практически весь объём груза сейчас отгружают на ж.д. Проблем с этим достаточно много — нехватка фитинговых платформ, часть контейнеров приходится ставить в полувагоны, что увеличивает стоимость выгрузки на станциях назначения, да и в целом пропускная способность БАМа и Транссиба недостаточна. Происходят «бросания» поездов из-за нехватки приёмных мощностей станций, сдвиг ниток из-за приоритетности отправок стратегически важных государственных контрактов в виде угля и пр. Всё это вызывает неопределённость на данном маршруте и увеличение потребной мощности складов. В штатном режиме длительность ожидания отгрузки по ж.д. занимает 7–14 суток, а в пиковые сезоны длительность ожидания отгрузки по ж.д. с портов ДВ доходит до 35–40 суток, что в свою очередь приводит к тому, что гружёные суда стоят на рейде, так как склады порта перегружены контейнерами. Если мы говорим о развитии Большого порта Санкт-Петербург, то в целом существующих мощностей вполне достаточно для обрабатываемого грузопотока с запасом. Если мы говорим о порте Новороссийска, то целесообразно рассмотреть возможность расширения туннелей под перевалом. Если мы говорим о порте Мурманска, то имеет смысл задуматься над комплексным расширением возможностей ж.д. на этом плече. Порты Дальнего Востока имеют два узких сечения — это пропускная способность БАМа и Транссиба и площади складов. Произведём простые расчёты.

Возьмём усреднённый контейнерный поезд — это 71 условный вагон. 71 условный вагон — это 142 ДФЭ. Так как мы считаем в оба направления, то будем исходить из 284 ДФЭ. Пропускная способность терминалов ДВ составляет 2262,67 ДФЭ/год. Следовательно, чтобы вывезти весь объём, нам потребуется 7967 поездов. Если пересчитать это в сутки, то получается, что нам требуется отгружать и принимать почти 22 поезда в сутки. В декабре 2024 года РЖД отчиталось об отправке 31 контейнерного поезда за сутки, 23 состава были на фитинговых платформах, а 8 поездов было сформировано из полувагонов. Как видно из расчётов — это вполне посильная задача при наличии необходимого числа фитинговых платформ и готовности принимающих станций. Провозная способность флота за первый квартал 2025 года на этом плече составляет ориентировочно 2447,2 тыс. ДФЭ в год, или 67000 ДФЭ/сутки. Если брать судно размером 2500 ДФЭ, то нам необходимо принимать и отгружать 26,8 судов/сутки. Обработка контейнеровоза вместимостью 2500 ДФЭ занимает около 3 дней, следовательно, нам нужно хранить объём контейнеров, равный 2-суточному накоплению минимум, т.е. 67000×2=134 000 ДФЭ, а лучше с запасом. Фактическая вместимость складов порта Владивосток составляет 34000 ДФЭ, ВМПП — 7148 ДФЭ, Пасифик Лоджистикс — 6300 ДФЭ, ВМРП — около 7000 ДФЭ, Восточный — 38000 ДФЭ, а суммарно — 92448 ДФЭ. Наглядно видно, что суммарной ёмкости складов не хватает почти в 1,5 раза, и это касается потребностей только морского фронта.

7 июня 2025 года в Российской Федерации был принят Федеральный закон №140-ФЗ о внесении изменений в Федеральный закон «О транспортно-экспедиционной деятельности» и отдельные законодательные акты Российской Федерации. Постановлением Правительства Российской Федерации № 1828 от 18 ноября 2025 года утверждён перечень организационных мер по выявлению предметов и веществ, указанных в статье 2.1 ФЗ «О транспортно-экспедиторской деятельности». Исходя из текста Постановления, экспедиторам предписывается производить проверку соответствия свойств принятого груза с информацией о свойствах груза, полученной от заказчиков. Проверку предполагается производить с использованием взвешивающих механизмов, а также визуальным способом или с применением измерительных приборов. При мультимодальных

перевозках это несложно выполнить при погрузке у отправителя, запросив фотографии с затарки контейнеров, и в порту погрузки, запросив VGM, который оформляется с июля 2016 года в соответствии с конвенцией SOLAS на каждый контейнер. На практике всё оказывается несколько сложнее, так как контракты внешнеэкономической деятельности заключаются не только на условиях EXW или FCA, но и на других базисах поставки, и у получателя не всегда есть возможность предоставить экспедитору фотографии или иные документы с порта погрузки. Это приведёт к тому, что при приходе контейнера в порт РФ экспедитор, во исполнение законодательства, будет обязан заявить контейнер на взвешивание, а в отношении других свойств груза — отправить контейнер на досмотр, так как прописанная в законодательстве мера в виде использования рентгенотепловизионных установок невыполнима. Этими установками владеют и оперируют таможенные органы РФ, которые не оказывают услуги по коммерческому предоставлению этих установок для частных заказчиков. Исходя из статистических данных ИАА Port News, за четыре месяца 2023 года всего 3% приходящих в порт Владивостока импортных контейнеров было подвержено физическому досмотру/осмотру, и средний срок проведения мероприятий сокращён до 2,5 суток. При росте количества досмотров с 3% до 50% вырастет и срок проведения комплекса мероприятий. Прогнозировать такое развитие событий крайне сложно, но, скорее всего, это вызовет коллапс в портовой системе и приведёт к неконтролируемым задержкам в работе порта, ж.д. и причального фронта.

Если скромно предположить, что половина контейнеров с каждого судна будет заявляться на взвешивание, а потом на досмотр, то описанные выше цифры по потребным мощностям складов оказываются занижены в разы. Если предположить, что вышеописанные операции будут укладываться в 5 суток на 1 контейнер, то нам требуется увеличить ёмкости хранения на половину грузопотока минимум на 5 суток, т.е. 67000/2=34000 ДФЭ, 34000×5=170 000 ДФЭ, 170 000 + 134 000 ДФЭ = 304 000 ДФЭ. А это нехватка площадей уже больше, чем в 3 раза (304 000 / 92488).

С другой стороны, в апреле 2026 года на портале «Морские вести России» вышла статья о проекте указа о «заградительных» требованиях для иностранных контейнерных перевозчиков. Крайнее беспокойство вызывает пункт о том, что суда, работающие на линии, должны находиться в собственности российского оператора, а значит и ходить под флагом РФ. В момент ухода мировых контейнерных линий сложился удобный момент для развития национальных контейнерных перевозчиков, что многие и попытались осуществить. Многолетний демпинг со стороны международных гигантов, обладающих судами класса Панамакс и VLCS, практически сводил на нет все попытки развития национальных операторов. Не углубляясь в теоретическую часть, можно сказать, что большинство судов российских операторов, работающих сейчас на международном направлении, зафрахтованы в тайм-чартер или рейсовый чартер. Эти суда ходят под удобными флагами — Панама, Белиз, Мальта и другими. Покупка судов в бербоут чартер, требующая значительных финансовых вложений, при существующих ставках рефинансирования практически нереальна. Но даже если найти деньги у частных инвесторов, то покупка вторичного флота при существующих на рынках ценах также выглядит достаточно сомнительно, а о покупке новых не идёт речь, так как основные мировые верфи загружены заказами почти на 10 лет вперёд. В случае принятия правительством РФ указа в том виде, о котором говорится в статье, можно предположить массовый уход с рынка существующих российских операторов, а также контейнерных операторов дружественных стран. Последствия такого ухода оценить сложно, но, скорее всего, это приведёт к резкому скачку стоимости фрахта, а также критичному недостатку провозных мощностей на всех плечах, вызовет перегрузку прямого железнодорожного и автомобильного сообщения, что также отразится на ценообразовании для конечного потребителя.

Результаты

Проведённый анализ позволяет сформулировать комплексную концепцию развития контейнерной логистической системы в увязке с актуальными геополитическими и инфраструктурными реалиями. В качестве базового элемента транспортной архитектуры оптимальным признаётся тоннаж с вместимостью до 2500 TEU (ДФЭ), что обусловливает высокую манёвренность и универсальность эксплуатации в условиях ограниченных портовых акваторий и неглубоких фарватеров.

Критическим вектором достижения суверенитета в области грузопереработки выступает необходимость государственного протекционизма, охватывающего весь спектр судостроительной и ремонтной вертикали: от модернизации верфей и закладки контейнеровозов до наращивания парка фитинговых платформ и локомотивного парка. При этом импортозамещение должно носить тотальный характер, особенно в сегменте портового перегрузочного оборудования (крановые системы, спредеры, ричстакеры), где существующий парк сталкивается с коллапсом сервисного и гарантийного обслуживания вследствие санкционных ограничений, что делает приоритетной задачей переход на отечественные образцы тяжёлого машиностроения.

Отдельного внимания заслуживает дихотомия развития терминальной инфраструктуры: наряду с глубочайшей модернизацией причальных стенок, тыловых площадок и железнодорожных подходов, требуется выработка сбалансированной стратегии дифференциации грузопотоков. Существующая тенденция моноспециализации терминалов исключительно под контейнерные перевозки вступает в противоречие с необходимостью сохранения мультимодального потенциала, что требует взвешенных технологических решений.

В качестве «узкого места» (bottleneck) системы на текущем этапе признаётся не дефицит тоннажа, а лимит пропускной способности береговой инфраструктуры, сдерживающий оборот судов и увеличивающий их стояночное время. Для устранения этого дисбаланса, а также для

эффективного освоения Северного морского пути, необходимы преференциальные меры: субсидирование фрахта, льготное кредитование приобретения судов на вторичном рынке, пересмотр налоговой базы для стимулирования репатриации флота под Государственный флаг РФ, а также формирование благоприятного страхового климата и упрощение процедур классификационного освидетельствования в Российском морском регистре судоходства.

Заключение

Проведённое исследование позволило установить, что оптимальным элементом транспортной архитектуры для маршрутов Российской Федерации на текущем этапе является полностью ячеистый контейнеровоз вместимостью до 2500 ДФЭ, обеспечивающий безопасную эксплуатацию в условиях акватории порта, неглубоких фарватеров и геополитической нестабильности ключевых транзитных коридоров — как через Босфор и Дарданеллы, так и в обход африканского континента. При этом основным сдерживающим фактором развития системы выступает ограниченная пропускная способность береговой и железнодорожной инфраструктуры: расчёты по Дальневосточному бассейну показали более чем полуторакратную нехватку складских площадей относительно фактического грузопотока, а вступление в силу требований по проверке и досмотру контейнеров способно усугубить данный дефицит.

В связи с этим достижение синергетического эффекта возможно лишь при комплексном и сбалансированном развитии всех звеньев логистической цепи одновременно: модернизации причальных стенок и тыловых площадок, расширения провозной способности БАМа и Транссиба, увеличения парка фитинговых платформ, а также при государственной поддержке национального судостроения и импортозамещения портового перегрузочного оборудования. Особую значимость приобретает вопрос сохранения баланса между специализацией терминалов под контейнерные перевозки и мультимодальным потенциалом портовой инфраструктуры, а также выработка преференциальных мер — субсидирования фрахта, льготного кредитования и упрощения процедур классификационного освидетельствования, — способных стимулировать репатриацию флота под Государственный флаг РФ без разрушительных последствий для действующих национальных и дружественных операторов, о которых свидетельствует обсуждаемый проект указа о заградительных требованиях к иностранным перевозчикам.

Таким образом, только коллегиальная выработка решений на стыке судостроения, судоходства, логистики, экономики морского транспорта и государственного управления позволит обеспечить переход к качественно новому уровню контейнерооборота, снять существующие инфраструктурные ограничения и укрепить транспортную безопасность государства в долгосрочной перспективе.

Литература

1. Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Семенов А.Д. Расчёт флота и парка контейнерного оборудования судоходной линии // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2021. Т. 13, № 4. С. 539-547. DOI 10.21821/2309-5180-2021-13-4-539-547. — EDN WQWVZU.
2. Кузнецов А.Л., Щербакова-Слюсаренко В.Н., Семенов А.Д. Тенденции развития и устойчивость глобальной контейнерной транспортно-логистической системы // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2022. Т. 14, № 1. С. 75-86. DOI 10.21821/2309-5180-2022-14-1-75-86. — EDN JGIPMJ.
3. Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Семенов А.Д. Оценка времени доставки в сложных цепях поставки с помощью моделирования // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2021. Т. 13, № 3. С. 372-383. DOI 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383. — EDN TNLNKM.
4. Analytical Agency Alphaliner. Статистические данные [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://alphaliner.axsmarine.com/PublicTop100/ (дата обращения: 02.02.2025).
5. BIMCO publishes. Shipping Market Overview & Outlook, September 2024, 14 pgs. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.bimco.org/news/market_analysis/2024/20240926, свободный (10.01.2025).
6. Container Xchange. Статистические данные [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.container-xchange.com/ (дата обращения: 10.01.2025).
7. Lena C. The World's Largest Shipping Container Ships in 2024, March 2024. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://scf.com.au/news-articles/largest-shipping-container-ships/ (дата обращения: 10.01.2025).
8. Rodrigue J.-P. Evolution of Containerships // The Geography of Transport Systems. 6th ed. New York: Routledge, 2024. 402 p. ISBN 9781032380407. DOI 10.4324/9781003343196. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://transportgeography.org/contents/chapter5/maritime-transportation/evolution-containerships-classes/ (дата обращения: 18.01.2025).
9. ИАА SeaNews. Контейнеровозы на вторичном рынке подорожали вдвое [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://seanews.ru/2025/01/30/ru-kontejnerovozy-na-vtorichnom-rynke-podorozhali-vdvoe/ (дата обращения: 11.02.2025).
10. World Shipping Council. Report Update, May 2023 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.worldshipping.org/statements/containers-lost-at-sea-2023-update (дата обращения: 15.02.2025).
11. Кириченко А.В., Кузнецов А.Л. Взаимоотношения города и порта: эволюция и перспективы // Транспорт Российской Федерации. 2014. № 1(50). С. 12-15. — EDN SCCIDV.

12. Кузнецов А.Л., Щербакова-Слюсаренко В.Н. Обоснование концепции “сухого” порта // Транспортное дело России. 2013. № 4. С. 77-80. — EDN RDIZFB.
13. Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Соляков О.В., Семенов А.Д. Порто-ориентированная логистика: монография. М.: Моркнига, 2021. 247 с. УДК 656.615. ISBN 978-5-903090-65-5.
14. Росморпорт ФГУП. Официальный сайт [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.rosmorport.ru/ (дата обращения: 09.02.2025).

References

1. Kuznecov A.L., Kirichenko A.V., Semenov A.D. Raschet flota i parka kontejnernogo oborudovaniya sudohodnoj linii [Calculation of Fleet and Container Equipment Park of a Shipping Line] // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. — 2021. — T. 13. — № 4. — S. 539-547. — DOI 10.21821/2309-5180-2021-13-4-539-547. — EDN WQWVZU.
2. Kuznecov A.L., Shcherbakova-Slyusarenko V.N., Semenov A.D. Tendencii razvitiya i ustojchivost' global'noj kontejnernoj transportno-logisticheskoj sistemy [Development Trends and Sustainability of the Global Container Transport and Logistics System] // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. — 2022. — T. 14. — № 1. — S. 75-86. — DOI 10.21821/2309-5180-2022-14-1-75-86. — EDN JGIPMJ.
3. Kuznecov A.L., Kirichenko A.V., Semenov A.D. Ocenka vremeni dostavki v slozhnyh cepyah postavki s pomoshch'yu modelirovaniya [Estimation of Delivery Time in Complex Supply Chains Using Modeling] // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. — 2021. — T. 13. — № 3. — S. 372-383. — DOI 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383. — EDN TNLNKM.
4. Analytical Agency Alphaliner. Statisticheskie dannye [Statistical Data]. [Elektronnyj resurs]. — Rezhim dostupa: https://alphaliner.axsmarine.com/PublicTop100/ (data obrashcheniya: 02.02.2025).
5. BIMCO publishes. Shipping Market Overview & Outlook, September 2024, 14 pgs. [Elektronnyj resurs]. — Rezhim dostupa: https://www.bimco.org/news/market_analysis/20240926 (data obrashcheniya: 10.01.2025).
6. Container Xchange. Statisticheskie dannye [Statistical Data]. [Elektronnyj resurs]. — Rezhim dostupa: https://www.container-xchange.com/ (data obrashcheniya: 10.01.2025).
7. Lena C. The World's Largest Shipping Container Ships in 2024, March 2024. [Elektronnyj resurs]. — Rezhim dostupa: https://scf.com.au/news-articles/largest-shipping-container-ships/ (data obrashcheniya: 10.01.2025).
8. Rodrigue J.-P. Evolution of Containerships [Evolution of Containerships] // The Geography of Transport Systems. 6th ed. New York: Routledge, 2024. 402 p. ISBN 9781032380407. DOI 10.4324/9781003343196. [Elektronnyj resurs]. — Rezhim dostupa: https://transportgeography.org/contents/chapter5/maritime-transportation/evolution-containerships-classes/ (data obrashcheniya: 18.01.2025).
9. IAA SeaNews. Kontejnerovozy na vtorichnom rynke podorozhali vdvoe [Container Ships Became Twice More Expensive on the Secondary Market]. [Elektronnyj resurs]. — Rezhim dostupa: https://seanews.ru/2025/01/30/ru-kontejnerovozy-na-vtorichnom-rynke-podorozhali-vdvoe/ (data obrashcheniya: 11.02.2025).
10. World Shipping Council. Report Update, May 2023. [Elektronnyj resurs]. — Rezhim dostupa: https://www.worldshipping.org/statements/containers-lost-at-sea-2023-update (data obrashcheniya: 15.02.2025).
11. Kirichenko A.V., Kuznecov A.L. Vzaimootnosheniya goroda i porta: evolyuciya i perspektivy [Relationship Between the City and the Port: Evolution and Prospects] // Transport Rossijskoj Federacii. — 2014. — № 1(50). — S. 12-15. — EDN SCCIDV.
12. Kuznecov A.L., Shcherbakova-Slyusarenko V.N. Obosnovanie koncepcii “suhogo” porta [Justification of the "Dry" Port Concept] // Transportnoe delo Rossii. — 2013. — № 4. — S. 77-80. — EDN RDIZFB.
13. Kuznecov A.L., Kirichenko A.V., Solyakov O.V., Semenov A.D. Porto-orientirovannaya logistika: monografiya [Port-Oriented Logistics: Monograph]. — M.: Morkniga, 2021. — 247 s. — UDK 656.615. — ISBN 978-5-903090-65-5.
14. Rosmorport FGUP. Oficial'nyj sajt [Official Website]. [Elektronnyj resurs]. — Rezhim dostupa: https://www.rosmorport.ru/ (data obrashcheniya: 09.02.2025).

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

Кузнецов Александр Львович, доктор технических наук, профессор, «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: thunder1950@yandex.ru

Aleksandr L. Kuznetsov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: thunder1950@yandex.ru

Кириченко Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: kirichenkoav@gumrf.ru

Aleksandr V. Kirichenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: kirichenkoav@gumrf.ru

Шагин Никита Сергеевич, аспирант, «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, SPIN: 4866-3508, e-mail: shaginnikita@mail.ru

Nikita S. Shagin, PhD student, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, SPIN: 4866-3508, e-mail: shaginnikita@mail.ru

Шаркова Василиса Павловна, магистрант, «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: sharkovavp@gumrf.ru

Vasilisa P. Sharkova, Master's student, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: sharkovavp@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.07.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 27.07.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 12.08.2026.

Обзорная статья
УДК 629.735.45:629.5.083
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.060

Беспилотные воздушные суда-амфибии: современное состояние и перспективы использования для мониторинга подводной части корпусов судов

Кулько Д.Д.[1] Kulko-2001@mail.ru**, Прощенко Д.Ю.**[1] dima.prsk@mail.ru, **Букин О.А.**[1] o_bukin@mail.ru
[1]Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия

Аннотация. В статье изложены результаты аналитических исследований современного состояния разработок беспилотных воздушных судов-амфибий (БВСА) с целью оценки потенциала их использования для осмотра подводной части корпусов судов. Актуальность исследования определяется современными тенденциями к автоматизации обязательного технического освидетельствования судов, их инспекции на предмет наличия посторонних объектов, а также необходимостью снижения издержек при проведении подводно-технических работ. На основе анализа работ проведена классификация существующих разработок БВСА, выделены четыре конструктивных класса беспилотных воздушных судов-амфибий: аппараты самолётного типа с фиксированным и складным крылом, мультироторные системы, гибридные аппараты вертикального взлёта и посадки (конвертопланы и аппараты, взлетающие с хвоста — тейлситтеры), а также аппараты бионического дизайна. Для каждого класса проанализированы технологии обеспечения совместимости воздушной и водной сред: профили движителей, трансформируемые несущие поверхности, системы изменяемой плавучести, технологии входа в воду и выхода из неё. По результатам сравнительного анализа существующих прототипов выявлено системное противоречие между развитием технологий переходной фазы «воздух–вода» и требованиями к устойчивому позиционированию аппарата у борта судна в условиях течений. Сформулированы перспективные направления разработки специализированной платформы для подводных осмотров корпусов судов, включая адаптивные движители с переменным шагом лопастей, сверхгидрофобные покрытия и алгоритмы удержания позиции относительно корпуса судна.
Ключевые слова: беспилотные воздушные суда-амфибии, гибридные аппараты, подводная инспекция, корпус судна, мультироторные аппараты, конструктивно-компоновочные схемы, движители, изменяемая плавучесть, переход «воздух–вода», портовая инфраструктура.
Для цитирования: Кулько Д.Д., Прощенко Д.Ю., Букин О.А. Беспилотные воздушные суда-амфибии: современное состояние и перспективы использования для мониторинга подводной части корпусов судов // Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 304—314. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.060

Review article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.060

Amphibious Unmanned Aerial Vehicles: Current State and Prospects for Monitoring the Underwater Part of Vessel Hulls

Dmitrii D. Kulko[1] Kulko-2001@mail.ru, **Dmitrii Yu. Proschenko**[1] dima.prsk@mail.ru,
Oleg A. Bukin[1] o_bukin@mail.ru
[1]Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of an analytical review of the current state of development of amphibious unmanned aerial vehicles (AUAV) aimed to assess their potential for inspecting the underwater part of vessel hulls. The relevance of the study is driven by current trends toward automating the mandatory technical survey of vessels, their inspection for the presence of foreign objects, and by the need to reduce the cost of underwater engineering operations. Based on the analysis of published works, a classification of existing AUAV developments is carried out, and four structural classes of amphibious unmanned aerial vehicles are identified: airplane-type aircraft with fixed and folding wings, multirotor systems, hybrid vertical takeoff and landing aircraft (tiltrotors and tail-sitters), and bionic-design vehicles. For each class, technologies for ensuring compatibility between the air and water environments are analyzed: propulsor profiles, transformable lifting surfaces, variable-buoyancy systems, and water-entry and water-exit technologies. The comparative analysis of existing prototypes revealed a systemic contradiction between the development of air–water transition-phase technologies and the requirements for stable positioning of the vehicle alongside a vessel's side in the presence of currents. Promising directions for the development of a specialized platform for underwater inspection of vessel hulls are formulated, including adaptive variable-pitch propellers, superhydrophobic coatings, and algorithms for holding position relative to the vessel's hull.
Keywords: amphibious unmanned aerial vehicles, hybrid vehicles, underwater inspection, vessel hull, multirotor vehicles, structural layout configurations, propulsors, variable buoyancy, air–water transition, port infrastructure.
For citation: Dmitrii D. Kulko, Dmitrii Yu. Proschenko, Oleg A. Bukin. Amphibious Unmanned Aerial Vehicles: Current State and Prospects for Monitoring the Underwater Part of Vessel Hulls. Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 304—314. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.060

© Кулько Д.Д., Прощенко Д.Ю., Букин О.А., 2026

Введение

В последнее десятилетие в области беспилотной робототехники отчётливо оформилось направление создания гибридных аппаратов, способных эффективно функционировать в воздушной и водной средах – беспилотных воздушных судов-амфибий (БВСА). В международной литературе за ними закрепился термин Amphibious Unmanned Aerial Vehicles (AUAV). Актуальность развития таких систем обусловлена необходимостью автоматизации сложных многоэтапных операций, исключающих участие человека и востребованностью выполнения комплексных прикладных задач без привлечения разнородных технических средств. Примером служит применение БВСА в области оптики океана [1].

Одним из наиболее перспективных и экономически значимых направлений применения БВСА является оперативное освидетельствование подводной части корпусов морских и речных судов, объектов портовой инфраструктуры и шельфовых сооружений. Традиционные методы инспекции с привлечением водолазных групп или использование телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) сопряжены с высокими финансовыми затратами, рисками для персонала, наличием специальной инфраструктуры либо требуют вывода плавсредств из эксплуатации, их длительного простоя на рейде. В данном контексте актуальность разработки БВСА сильно возрастает в связи с введением Минтрансом РФ требований об обязательном осмотре судов, прибывающих из иностранных портов. Способность БВСА оперативно доставлять инспекционный модуль по воздуху на удалённые якорные стоянки позволит портам соблюдать новые регуляторные нормы без снижения пропускной способности терминалов.

Высокая скорость воздушного полёта аппарата позволяет оперативно проводить обязательное освидетельствование на удалённых внешних якорных стоянках до захода плавсредств в порт, исключая финансовые убытки судовладельцев от простоя на рейде. Способность аппарата работать в двух средах позволяет одному устройству решать одновременно несколько задач: осуществлять надводный оптический мониторинг бортов и палубы, мониторинг экологической ситуации вокруг судна в полёте, а после приводнения осуществлять мониторинг подводной части корпуса судна. Внедрение такой технологии значительно снижает издержки портовых операторов и перевозчиков на проведение досмотра, предлагая экономически обоснованную альтернативу дорогостоящим стандартным методам.

Проектирование БВСА сопряжено с решением ряда сложных проблем на стыке аэродинамики, гидродинамики, материаловедения и искусственного интеллекта. При разработке таких комплексов необходимо решать, как фундаментальные, так и технические задачи. Первые обусловлены противоречивостью физических требований к геометрии аппарата для эффективного движения в воздушной и водной средах; сложностью моделирования нелинейных гидродинамических нагрузок в момент динамического перехода «воздух–вода»; необходимостью обеспечения сквозной, автономной навигации и бесперебойной связи при смене сред распространения сигнала. К основным техническим проблемам можно отнести создание сверхлегких, но устойчивых к высокому гидростатическому давлению композитных корпусов, необходимость абсолютной герметизации электроники и силовой установки при сохранении весового баланса, разработку гибридных движителей (пропеллеров/винтов), способных эффективно работать как в воздухе, так и под водой.

Ключевой теоретической проблемой БВСА является обеспечение совместимости сред на всех фазах миссии, в работе [2] подробно описаны все фазы и их особенности. Плотность воды превышает плотность воздуха примерно в 800 раз, а кинематическая вязкость меньше примерно в 15 раз, что порождает ряд фундаментальных проблем.

Необходимо решить проблему формы и геометрии лопастей: эффективные для создания подъёмной силы в воздухе при высоких оборотах, они приводят к кавитации и экстремальным нагрузкам при работе в водной среде. Пропеллер, оптимизированный для воздушной среды, в воде теряет значительную долю КПД.

Необходимо устранить противоречие весовых и прочностных параметров: энергоэффективный полёт требует минимальной массы конструкции, тогда как работа на глубине предполагает высокую прочность корпуса и герметизацию электроники, что неизбежно увеличивает массу аппарата.

Одной из главных проблем является связь и навигация в режиме подводного плавания. Радиоволны и сигналы ГНСС затухают в воде на глубине первых десятков сантиметров. Это требует полной перестройки контура системы управления — от радиокомандного в воздухе к автономному позиционированию под водой и навигации с использованием компьютерного зрения.

Применительно к задаче инспекции корпусов судов перечисленные противоречия обостряются: аппарату необходимо не просто физически преодолеть границу сред, но и сохранить высокую гидродинамическую устойчивость вблизи стальной обшивки в условиях течений. Для видеофиксации состояния корпуса судна под водой необходимо точное позиционирование относительно корпуса с сохранением ориентации аппарата.

В работе приводятся аналитический обзор и сравнительный анализ существующих конструктивно-компоновочных схем БВСА, а также определяются ключевые технологические ограничения. Установлены системные противоречия между развитием технологий преодоления границы «воздух — вода» и требованиями к устойчивому позиционированию аппарата у борта судна.

Рассмотрены современные технологии, направленные на повышение эффективности БВСА,

Аналитический обзор конструктивно-компоновочных схем БВСА

На рис. 1 приведена классификация БВСА по типу конструкции и аэро/гидродинамической схеме аппарата. Классификация проведена на основе анализа опубликованных статей. Классификация делит известные прототипы БВСА на четыре ключевые группы: аппараты самолётного типа (с фиксированным или складным крылом), мультироторные аппараты вертикального взлёта и

посадки (VTOL/Multirotor AUAV), гибридные аппараты VTOL (конвертопланы и тейлситтеры), а также аппараты бионического дизайна. В отличие от существующей классификации [1], предложенный подход ориентирован на специфику целевого применения БВСА. Это позволяет более наглядно сопоставить конструктивные особенности различных типов беспилотных комплексов с требованиями к выполнению миссий по подводному осмотру судов.

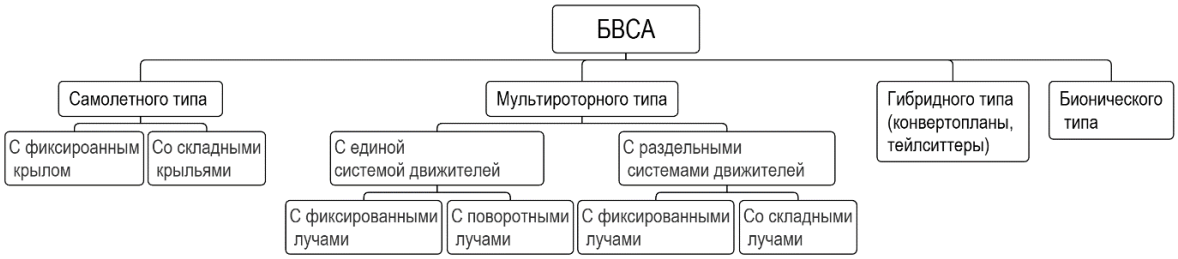


Рис. 1. Основные конструктивные классы БВСА

БВСА самолётного типа

Аппараты с фиксированным крылом

Данный класс проектируется на базе классической аэродинамической схемы с неподвижным крылом. Основной приоритет — высокая дальность и скорость воздушного перемещения; погружение рассматривается как вспомогательный режим. В работе [3] приведены характеристики дрона-амфибии EagleRay XAV с неподвижным крылом. Аппарат выполнен по схеме высокоплана с единственным носовым тянущим пропеллером, используемым как в воздухе, так и под водой. Масса — 5,71 кг, размах крыла — 150 см, длина — 140 см. Крыло имеет пассивно затопляемую полость: вода свободно заполняет крыло через дренажные отверстия, компенсируя избыточную плавучесть подводного хода. Это исключает необходимость в балластной системе, упрощая конструкцию. При натурных испытаниях зафиксированы ударные перегрузки при приводнении: среднее значение 8,4 G, пиковое — 11,7 G, что приводит к повреждению бортовых датчиков. Максимально достигнутая подводная скорость — 0,89 м/с; дальнейший рост скорости в водной среде прекратился вследствие выхода регулятора на предел насыщения. Конструктивные ограничения аппаратов данного класса исключают возможность зависания и точного позиционирования, что препятствует их эффективному применению в задачах мониторинга подводной части корпусов судов.

Аппараты со складными крыльями

С целью снижения гидродинамического сопротивления при подводном ходе ряд исследовательских групп развивает концепции аппаратов с трансформируемой геометрией несущих поверхностей. В работе [4] представлена разработка аппарата этого класса - BUUAS (Bimodal Unmanned Underwater/Air System) — аппарат с убирающимися назад крыльями. Масса — около 3,2 кг, размах в раскрытом положении — 1,5 м. Для воздушного транзита заявлена крейсерская скорость около 20 м/с; при подводном ходе — около 2 м/с. Крылья складываются назад на 65° вдоль фюзеляжа, что существенно снижает лобовое сопротивление при подводном ходе. Единый электродвигатель с компромиссным профилем винта обеспечивает движение в обеих средах. Переход «вода–воздух» осуществляется посредством реактивного выброса струи под давлением сжатого газа CO_2, создающего стартовый импульс. Одноразовое использование баллона сжатого газа для взлёта с воды ограничивает количество циклов перехода «вода–воздух» в пределах одной миссии. Точное позиционирование у борта судна невозможно — аппарат не способен зависать.

Аппараты самолётного типа обладают наилучшей энергоэффективностью в воздухе и максимальной дальностью перелета, однако их использование ограничено для задач инспекции корпусов судов. Принципиальная неспособность к зависанию исключает точное позиционирование у борта. Развитые крыльевые конструкции создают критический риск столкновения с элементами корпуса судна.

Мультироторные БВСА вертикального взлёта и посадки (VTOL Multirotor)

Мультироторные БВСА составляют наибольшую долю среди существующих прототипов. Способность к зависанию в воздухе и вертикальному переходу границы сред делает их наиболее близкими по функциональности к требованиям инспекционных задач.

Аппараты с единым комплексом движителей и фиксированными лучами

В данной подгруппе воздушные пропеллеры используются и для подводного хода, что является конструктивно простым, но энергетически неэффективным решением.

В литературе представлены аппараты компактного размера, которые предназначены в основном для отработки методов и технических элементов БВСА этого класса. В работе [5] представлен малогабаритный вертикально ориентированный квадрокоптер Mini-UAUV с единым комплексом воздушных пропеллеров для обеих сред. Как правило, такие аппараты имеют максимально упрощённую конструкцию без какой-либо трансформации. Единый набор воздушных пропеллеров работает как в воздухе, так и под водой. Приведённые результаты испытаний демонстрируют, что воздушные пропеллеры крайне неэффективны в водной среде: авторы экспериментально зафиксировали резкое падение тяги при переходе в воду. Вертикально

ориентированный корпус без складных элементов обладает максимальным лобовым сопротивлением при горизонтальном подводном движении. Аппарат с трудом справляется с течениями и маневрированием под водой.

На рис. 2 представлен БВСА Naviator [6]. Квадрокоптеры соосной схемы имеют четыре верхних винта и четыре нижних. Благодаря высоким моторным стойкам в момент перехода верхние винты находятся над водой и в форсированном режиме вытягивают аппарат, а нижние винты работают в подводном режиме и толкают аппарат на поверхность. В момент, когда нижние винты выходят из воды, они переходят в воздушный режим. Такой алгоритм позволяет сделать переход более стабильным и предсказуемым. Экспериментально показано, что соосная движительная установка с противоположным вращением винтов теряет значительную долю тяги при работе в водной среде. Вертикальный корпус с выступающими лучами создаёт максимальное лобовое сопротивление при горизонтальном подводном движении, что делает маневрирование вблизи корпуса судна энергетически неэффективным. Подобные аппараты не способны перемещаться во всех плоскостях с сохранением горизонтальной ориентации корпуса.



Рис. 2. Мультироторный БВСА Naviator соосной схемы и с фиксированными лучами

На рис. 3 представлен БВСА, принадлежащий к этому же классу многороторных БВСА с фиксированными лучами, но с более эффективной винтовой группой, AAU Energy Drone [7]. Ключевым отличием являются пропеллеры с изменяемым шагом (Variable Pitch Propellers): бортовая система автоматически регулирует угол атаки лопастей в зависимости от плотности среды, оптимизируя рабочую точку мотора как для полёта, так и для подводного хода без перегрева. Система способна генерировать реверсивную тягу для движения вниз под водой. Управление построено на алгоритмах адаптивной стабилизации на границе сред.



Рис. 3. Мультироторный БВСА Energy Drone с фиксированными лучами, пропеллеры с изменяемым шагом

Energy Drone находится на стадии лабораторного прототипа; данные о детальных лётно-технических характеристиках и результатах испытаний в открытом доступе ограничены.

Оригинальное решение для использования одной группы винтов как для воздуха, так и для воды приведено в работе [8], в которой авторы применили пассивно трансформирующиеся пропеллеры (passively morphing propellers): под воздействием гидродинамических сил при погружении лопасти самостоятельно складываются, снижая нагрузку на моторы. При входе в воздушную среду центробежные силы возвращают лопасти в исходное положение без сервоприводов. Прототип Aerial-Aquatic Hitchhiking Robot способен совершать до 7 последовательных циклов перехода «воздух–вода–воздух» за 20 секунд и фиксироваться на подводных поверхностях с помощью адгезионного диска. Такая конструкция винтов повышает их устойчивость к ударам о воду, ускоряет переход между средами, обеспечивает большую эффективность под водой по сравнению с классическим воздушным винтом такого же диаметра. Однако эффективность движения аппарата под водой значительно ниже, чем у аппаратов со специализированными подводными движителями. По результатам испытаний — максимальная скорость движения под водой – порядка 0,35 м/с, грузоподъёмность минимальна.

Аппараты с единым комплексом движителей и поворотными лучами для изменения вектора тяги

Наклон моторных стоек позволяет перенаправлять вектор тяги, повышая манёвренность под водой без наклона всего корпуса. В работе [9] приведены результаты тестирования БВСА MAA Quad. Квадрокоптер массой 0,5 кг с четырьмя поворотными лучами, на каждом из которых расположен воздушный движитель. Все четыре плеча синхронно поворачиваются в диапазоне от −90° до +90° вокруг своей продольной оси посредством единственного сервопривода (coupled symmetric thrust vectoring). Это позволяет ориентировать суммарный вектор тяги в горизонтальной плоскости без наклона корпуса, обеспечивая горизонтальное перемещение под водой при сохранении глубины погружения. Единый сервопривод обеспечивает только симметричное (связанное) отклонение лучей: независимое управление отдельными моторами невозможно, что снижает гибкость манёвров. Воздушные пропеллеры используются и под водой в результате чего эффективность подводного перемещения низкая.

Приведённое выше ограничение в повороте лучей снято в работе [10]. Аппарат TJ-FlyingFish на рис. 4 имеет более совершенную конструкцию, где каждый луч поворачивается независимо, что даёт полный контроль вектора тяги в трёх плоскостях. Дополнительно каждый движитель оснащён двухступенчатым редуктором: при реверсе электромотора активируется понижающая передача, увеличивающая момент и адаптируя режим работы пропеллера к высокой плотности воды. Это решение увеличивает КПД подводного движения по сравнению с аппаратами без редукторов. Однако двухступенчатый редуктор увеличивает механическую сложность системы и механические

потери на вращение в обеих средах. Авторы отмечают риск потерь мощности вследствие износа шестерён при длительной эксплуатации в морской воде. Воздушные пропеллеры используются в неоптимальном режиме под водой, несмотря на редуктор.

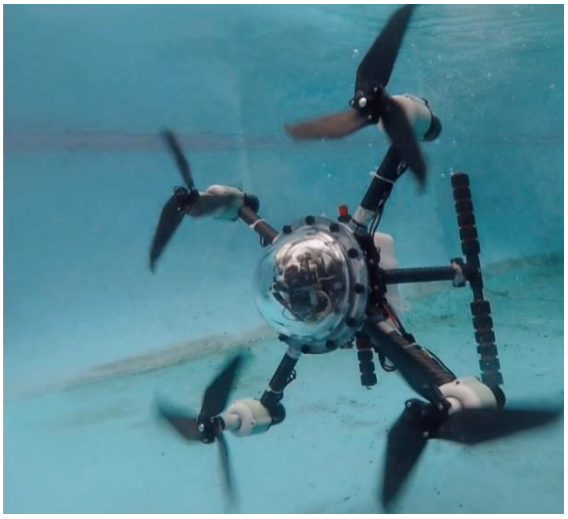


Рис. 4. Мультироторный БВСА TJ-FlyingFish с поворотными лучами, движители с редукторами

Аппараты с раздельными движителями и фиксированными лучами

Раздельные специализированные комплексы воздушных и подводных движителей обеспечивают работу каждого в расчётном режиме, повышая общий КПД. Плата за это — увеличение суммарной массы системы движителей.

На рис. 5 представлен БВСА Nezha-mini – это миниатюрный аппарат массой 953 г, компактностью сопоставимый с листом формата А4 [11]. Горизонтально ориентированный корпус; четыре воздушных движителя по квадрокоптерной схеме и три подводных движителя (один вертикальный носовой, два маршевых). Масса системы движителей составляет около половины взлётной массы аппарата.



Рис. 5. БВСА Nezha-mini с разделёнными движителями и фиксированными лучами

Разделение функций движителей позволяет оптимизировать геометрию воздушных и подводных лопастей независимо. Аппарат обеспечивает манёвренность в диапазоне высот до 50 м по воздуху и до глубин 6 м под водой. Трёх подводных движителей недостаточно для стабильного удержания горизонтального положения корпуса при боковых течениях: авторы признают ограниченность манёвренности в горизонтальной плоскости. Фиксированные лучи квадрокоптера увеличивают лобовое сопротивление при подводном ходе.

Аппарат WuKong, изображён на рис. 6, описан в работе [12]. Он имеет схему с двумя воздушными винтами и четырьмя подводными движителями. (схема полётной платформы — бикоптер). Четыре вертикально ориентированных подводных движителя обеспечивают манёвренность в обоих горизонтальных направлениях. Бикоптерная схема более энергоэффективна в воздухе, но менее стабильна при наличии ветра и менее устойчива к отказам, чем квадрокоптерная. Изменение вектора горизонтальной тяги под водой связано с наклоном корпуса, что значительно снижает стабильность и манёвренность на малых скоростях во время инспекции. Фиксированные лучи сохраняют высокое подводное лобовое сопротивление. Четырёх фиксированных сонаправленных подводных движителей недостаточно для сохранения ориентации в подводных течениях.



Рис. 6. БВСА WuKong бикоптер с раздельными движителями

Аппараты с раздельными движителями и складными лучами

Комбинация раздельных движителей и убирающихся лучей представляет наиболее функционально сбалансированную подгруппу мультироторных БВСА: она сочетает эффективность специализированных движителей со сниженным гидродинамическим сопротивлением. Яркими представителями являются аппараты серии Nezha, разработанные в Шанхайском университете [13–16].

Основные конструктивные особенности данного класса БВСА были реализованы в концепции Nezha-Morphing [13] (рис. 7). Аппарат с горизонтально ориентированным корпусом-торпедой, четырьмя складными плечами по Н-образной схеме, двумя хвостовыми продольными движителями и одним вертикальным движителем в носовой части.

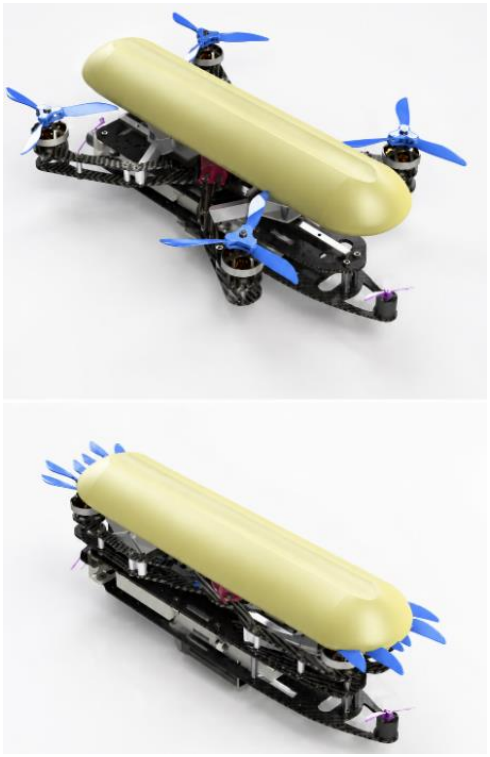


Рис. 7. БВСА Nezha-Morphing

БВСА снабжён надёжным и простым механизмом трансформации: все четыре плеча убираются вдоль корпуса единственным сервоприводом. При погружении аппарат принимает торпедовидную форму с минимальным сопротивлением. Подводная скорость — 0,620 м/с; время перехода «вода–воздух» — 1,5 с. Горизонтальный вход в воду снижает ударные нагрузки по сравнению с вертикальным.

Набор из двух хвостовых, одного носового движителей не обеспечивает достаточной манёвренности под водой: движение лагом практически недоступно, что делает точное позиционирование у борта судна затруднительным. Устойчивость к ветру на границе сред оценивается авторами как умеренная и данные требуют верификации.

На рис. 8 приведён БВСА Nezha - Mb [14], который является дальнейшим развитием концепции Morphing с более компактным и обтекаемым корпусом. Складные лучи убираются в цилиндрический корпус диаметром около 134 мм посредством линейных актуаторов с зубчатой рейкой. Масса механизма трансформации составляет около 11% взлётной массы аппарата. Аппарат сочетает обтекаемость корпуса для подводного хода с отдельными подводными движителями и полноценную квадрокоптерную схему в воздухе. Компоновка подводных движителей аналогична Nezha-Morphing (два хвостовых + один носовой вертикальный), что сохраняет ограниченность манёвренности под водой и неустойчивость к боковым течениям. Зубчато-реечный механизм поворота лучей требует надёжной защиты от засорения в реальных условиях эксплуатации.



Рис. 8. БВСА Nezha-Mb

В работе [15] рассматривается вертикальная конструкция БВСА данного класса. На рис. 9 БВСА Nezha-F - аппарат с вертикально ориентированным цилиндрическим корпусом, четырьмя воздушными роторами на складных лучах и поршневой системой переменной плавучести (PVBS — Piston Variable Buoyancy System). Складные лучи механически связаны с поршнем, во время взятия балласта сервопривод двигает поршень балластной системы и одновременно убирает лучи, уменьшая гидродинамическое сопротивление. В подводном режиме корпус сохраняет вертикальную ориентацию. За счёт управления балластом без работы активных движителей аппарат способен длительное время дрейфовать в режиме «буя» с минимальными затратами энергии. В подводном режиме перемещение возможно только по вертикали (изменение глубины) за счёт балласта, горизонтальное маневрирование у борта судна невозможно. Механическая связь балластной системы и механизма складывания лучей снижает надёжность системы при работе в засоренной воде, но при этом значительно облегчает конструкцию.



Рис. 9. БВСА Nezha-F

Nezha-X [16] — аппарат с торпедообразным корпусом и единственным поперечным крылом, которое поворачивается на 90° вдоль корпуса при погружении (рис. 10). В раскрытом положении крыло образует плюс-конфигурацию или «+4». В этой геометрии один из лучей рамы (в данном случае

цилиндрический корпус) жёстко направлен вперед по ходу движения БВСА с двумя воздушными движителями на концах и два движителя располагаются на концах крыла. Пассивно складывающиеся лопасти роторов при погружении ориентируются по потоку. Аппарат спроектирован для запуска из трубы: в сложенном состоянии габариты минимальны. Подводная тяга обеспечивается тремя кормовыми морскими движителями с ограниченной возможностью изменения вектора тяги. Винты, расположенные на дне носовой и кормовой части, в начальный момент взлёта с воды находятся ниже ватерлинии и не создают эффективной тяги, что существенно затрудняет взлёт при волнении. Манёвренность под водой ограничена из-за ограниченного количества и сонаправленного расположения подводных движителей.



Рис. 10. БВСА Nezha-X

Несмотря на возможность зависания и плавной посадки на воду, мультироторные БВСА с фиксированными лучами обладают высоким гидродинамическим сопротивлением под водой. Выступающие лучи и мотогондолы создают эффект «якоря» при воздействии подводных течений, неизбежно присутствующих у бортов судов. Аппараты со складными лучами и раздельными движителями существенно лучше по этому критерию, однако большинство из них имеют ограниченную манёвренность под водой из-за недостаточного числа фиксированных подводных движителей.

БВСА гибридного типа (конвертопланы и тейлситтеры)

Конвертопланы и тейлситтеры (Tail-sitter — буквально «сидящий на хвосте», гибридный аппарат вертикального взлета и посадки, выполняющий переход в режим горизонтального полёта путем изменения пространственной ориентации всего корпуса на 90°). объединяют функции аппаратов самолетного типа и при этом способны к вертикальному взлету и посадке. Аппараты этого класса имеют большую автономность в воздухе. В работе [17] приведён обзор данного класса БВСА и описана наиболее общая конструкция амфибийных конвертопланов и тейлситтеров вертикального взлёта и посадки.

Конвертоплан Diving Hawk (рис. 11) [17] оснащён водонепроницаемыми поворотными роторами (tilt-rotor), распределённой системой изменяемой плавучести (Distributed Variable Buoyancy System, DVBS) и полыми крыльями с V-образностью 10°. Расчётная взлётная масса около 8,9 кг. Поворотные роторы обеспечивают как вертикальный взлет, так и подводную движущую силу без отдельного набора специализированных движителей. Подвижный хвостовой стабилизатор с положительной плавучестью управляет дифферентом при подводном планировании. Полые крылья снижают массу конструкций, а балластная система обеспечивает контролируемое погружение и всплытие без постоянной работы движителей, что критично для длительных миссий.



Рис. 11. БВСА Diving Hawk

В работе [18] приведено описание разработки аппарата Nezha-Sea Dart (рис. 12). Аппарат типа тейлситтер и в отличие от конвертоплана не имеет сложных механизмов поворота крыла или отдельных поворотных двигателей. Двигатели и винты жёстко зафиксированы. Чтобы перейти от вертикального взлета к горизонтальному полёту, аппарат разворачивается в воздухе целиком вместе с корпусом. С дельтовидным крылом, его масса около 4,4–4,5 кг, размах крыла — 0,8 м. Продемонстрированная автономность: до 15 минут в воздухе (крейсерская скорость 10–12 м/с) и до 22 минут подводного хода. Максимальная глубина погружения по результатам 10-дневных полевых испытаний составляет до 50 м. Единая силовая установка из четырёх воздушных пропеллеров используется как для полёта, так и для движения под водой — механизм трансформации геометрии отсутствует. Аппарат взлетает и садится вертикально (VTOL), совершает контролируемое пикирование с пересечением границы сред и автономно выходит на воздух в режиме тейлситтера.



Рис. 12. БВСА Nezha-Sea Dart

Схема с воздушными пропеллерами сохраняет присущий этому классу компромисс: пропеллеры, оптимальные для воздуха, работают с пониженным КПД под водой. Дельтовидное крыло создаёт значительное лобовое сопротивление при горизонтальном подводном ходе и значительно снижает манёвренность аппаратов под водой, что ограничивает его использование для решения задачи осмотра подводной части корпуса судна.

БВСА VTOL-типа предлагают наиболее широкий диапазон режимов работы, однако сложность их конструкции и сравнительно большая масса ограничивают применение в стеснённых условиях портовых акваторий. Преимущества по дальности и автономности наиболее ценны для осмотра открытых акваторий, а не для прицельной инспекции у борта судна.

БВСА бионического дизайна

В литературе описаны проекты, посвящённые разработке БВСА, копирующих возможности движения биологических объектов (рыб, птиц и насекомых). Например, AquaMAV (рис. 13) [19] имитирует ныряющую птицу-олушу, складывающую крылья перед ударом о воду.

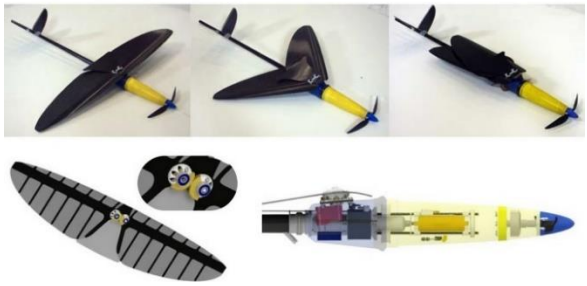


Рис. 13. БВСА AquaMAV

Бионические роботы представляют высокую научную ценность, однако для прикладных задач инспекции судов они неприменимы: все существующие прототипы имеют чрезвычайно малую грузоподъёмность и низкую устойчивость к внешним возмущениям. Данная группа рассмотрена для полноты обзора и обоснования дальнейшего выбора схемы.

Технологии, повышающие эффективность БВСА

Анализ мирового опыта позволяет выделить комплекс ключевых технологий, определяющих эффективность БВСА:

1. Адаптивные движительные установки

При решении задачи маневрирования БВСА под водой прибегают к различным методам: использование двух раздельных комплексов движителей для воздушной и водной сред, использование воздушных движителей под водой без каких-либо доработок, использование только балластных систем для погружения и гидродинамического планирования, использование адаптивной движительной установки, которая способна эффективно работать как под водой, так и в воздухе. Адаптивная движительная установка способна одновременно удовлетворить требования по энергоэффективности, манёвренности и весу.

Развитие направления адаптивных движителей идёт по трём направлениям:

- Изменение шага лопасти (AAU Energy Drone [7]).
- Использование понижающего редуктора (TJ-FlyingFish [10]).
- Пассивная трансформация формы винта (Aerial-Aquatic Hitchhiking Robot [8] и BUUAS [4]).

2. Трансформация несущих поверхностей (Morphing wing techniques)

Для аппаратов с развитыми несущими поверхностями критично лобовое сопротивление при движении под водой. Активное складывание лучей сервоприводами (Nezha-F, Nezha-Morphing, Nezha-Mb, Nezha-X) [13-16] позволяет изменять конфигурацию аппарата непосредственно перед погружением в воду. Гидродинамический расчет для Nezha-X показал снижение подводного сопротивления на 41,9% при сложенном крыле. Аналогичные тесты, проведённые с корпусом Nezha-Mb [14], также показали снижение гидродинамического сопротивления, что подтверждает эффективность системы складных лучей. Сложенные несущие поверхности снижают вероятность повреждения или запутывания под водой.

3. Системы регулирования плавучести

Для компенсации плавучести легкой конструкции и обеспечения подводного хода применяются системы изменяемой плавучести. В аппарате Nezha-F [15] управление плавучестью интегрировано с механизмом складывания лучей (PVBS), что позволяет не использовать дополнительный электропривод и уменьшить массу аппарата. В Diving Hawk [17] применяется распределённая система DVBS с управляемым хвостовым стабилизатором, это позволяет не только управлять величиной плавучести, но и ее распределением вдоль корпуса для подводного планирования.

4. Бионические методы погружения

Копирование природных аналогов снижает перегрузки при входе в воду. Проект AquaMAV [19] имитирует морских птиц, складывающих крылья в момент касания поверхности, что позволяет избежать разрушительного воздействия водной поверхности. Аналогичный подход был использован при создании BUUAS (Bimodal Unmanned Underwater/Air System) [4].

5. Гидрофобные покрытия

Остаточная влага на корпусе и винтах увеличивает стартовую массу аппарата при выходе из воды. Для решения этой проблемы в современных БВСА применяются сверхгидрофобные покрытия и системы дренажа. Кроме того, при прорыве поверхности воды лопасти движителей сталкиваются с высоким гидродинамическим сопротивлением и эффектом присоединенной массы, что требует форсирования оборотов винтов для создания избыточной тяги. Использование гидрофобных покрытий на лопастях снижает сцепление с водой и ускоряет переход аппарата в воздушную среду.

6. Технологии реактивного выхода из воды

Взлёт с водной поверхности требует преодоления гравитационных и гидродинамических сил. В BUUAS [4] и AquaMAV [19] для этого применяется реактивный импульс от выброса струи воды под давлением сжатого газа, обеспечивающий достаточное ускорение для полного выхода из воды. Аналогичный принцип используют тихоокеанские кальмары, способные пролетать до 30 метров над поверхностью воды.

Заключение

В настоящем обзоре систематизированы конструктивно-компоновочные схемы беспилотных воздушных судов-амфибий, разработанные в период с 2017 по 2025 год, и выделены четыре основных класса: аппараты самолётного типа, мультироторные системы, гибридные аппараты вертикального взлёта и посадки и аппараты бионического дизайна. Проведённый анализ показал, что развитие технологий совместимости сред сосредоточено преимущественно на оптимизации переходной фазы «воздух–вода», тогда как задача инспекции подводной части корпуса судна предъявляет принципиально иные требования — к устойчивой работе аппарата в непосредственной близости от борта судна в условиях течений.

Корпус судна представляет собой протяжённую стальную поверхность сложной геометрии площадью от десятков до тысяч квадратных метров, с труднодоступными зонами — нишами винторулевых групп и подруливающих устройств, шпигатами и кингстонными ящиками. Обследование осложняется биологическим обрастанием, эксплуатационными дефектами и риском присутствия посторонних объектов на обшивке, а также непредсказуемыми течениями и высокой мутностью воды в акваториях портов. В таких условиях определяющими становятся именно подводные характеристики аппарата: он должен плавно пересечь границу сред, не теряя из виду обследуемый объект, устойчиво перемещаться вдоль борта, сохранять ориентацию относительно корпуса и выдерживать дистанцию в пределах десятков сантиметров. Значительная площадь обследования делает энергоэффективность ключевым фактором всей миссии, а полная автономность под водой — повышает требования к бортовым вычислительным средствам и алгоритмам машинного зрения.

Анализ литературы, охватывающий период до 2026 года включительно, не выявил платформы, которая одновременно отвечала бы всем потребностям инспекционного сценария: низкое гидродинамическое сопротивление корпуса БВСА без выступающих элементов в подводной фазе; достаточное число степеней свободы для маневрирования у борта; повторяемый и предсказуемый переход между средами; автономная навигация вдоль корпуса; а также энергоёмкость, достаточная для подлёта к объекту, цикла подводных работ и возвращения. Каждое из этих свойств по отдельности реализовано в существующих прототипах, однако их сочетание в рамках единой платформы остаётся незакрытой конструктивной нишей.

Результаты обзора указывают на несколько перспективных направлений. С точки зрения компоновки наиболее продуктивным представляется переход к «водно-ориентированному» проектированию, при котором аппарат создаётся исходя из требований подводной манёвренности, а воздушное перемещение обеспечивается складными несущими элементами, — в отличие от преобладающего сегодня подхода, когда функция погружения добавляется к готовой мультироторной платформе. С точки зрения технологий первоочередного внимания заслуживают адаптивные движители с изменяемым шагом или геометрией лопастей или пассивной трансформацией, сверхгидрофобные покрытия несущих поверхностей, механизмы трансформации несущих поверхностей. Алгоритмы удержания позиции относительно подвижной поверхности корпуса в условиях неравномерного течения — задача, практически не исследованная в литературе по БВСА. Обзоры [1], [2], [20] подтверждают, что большинство существующих платформ не выходили за рамки прибрежных демонстраций, а испытания в реальных морских условиях остаются необходимым шагом для всего класса инспекционных аппаратов.

Формализация технических требований к специализированной платформе и обоснование её компоновочной схемы на основе многокритериального сравнительного анализа рассмотренных прототипов составляют предмет дальнейших исследований

Литература

1. Qi H., Hu S., Zhang J., Wu G. Review of Hybrid Aerial Underwater Vehicle: Potential Applications in the Field of Underwater Marine Optics // Drones. — 2025. — Vol. 9, no. 10. — Art. 667. — DOI: 10.3390/drones9100667.
2. Yao G., Yang H., Mao Z., Song J., Wang Z., Bi Y., Pan D., Lyu C., Zhang X., Fang X., Liu Y., Xu G., Bai Y., Song A., Tian J., Wang X., Deng H., Zhao T., Tan J. Review of hybrid aquatic-aerial vehicle (HAAV): classifications, current status, applications, challenges and technology perspectives // Progress in Aerospace Sciences. — 2023. — Vol. 139. — Art. 100902. — DOI: 10.1016/j.paerosci.2023.100902.
3. Weisler W., Stewart W., Anderson M., Peters K., Gopalarathnam A., Bryant M. Testing and Characterization of a Fixed Wing Cross-Domain Unmanned Vehicle Operating in Aerial and Underwater Environments // IEEE Journal of Oceanic Engineering. — 2017. — Vol. 43, no. 4. — Pp. 969–982. — DOI: 10.1109/JOE.2017.2742798.
4. Guo D. Modelling and Experimental Investigations of a Bi-Modal Unmanned Underwater/Air System: Ph.D. Thesis. — Melbourne: RMIT University, 2019.
5. Zha J., Siddall R., Mugica L., Kovač M. Towards Breaching a Still Water Surface with a Miniature Unmanned Aerial Underwater Vehicle // Proc. 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). — Atlanta: IEEE, 2019. — Pp. 1178–1185.

6. Maia M.M., Mercado D.A., Diez F.J. Design and Implementation of Multirotor Aerial-Underwater Vehicles with Experimental Results // Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). — Vancouver: IEEE, 2017. — Pp. 961–966.
7. Witten P. AAU-drone can both fly and dive underwater [Электронный ресурс] // Aalborg University. — 2025. — URL: https://www.energy.aau.dk/aau-drone-can-both-fly-and-dive-underwater-n145124 (дата обращения: 01.06.2025).
8. Li L., Wang S., Liu F., He Y., Xue Y., Guo J., Zhang D., Ma L., Li K., Li T. Aerial-aquatic robots capable of crossing the air-water boundary and hitchhiking on surfaces // Science Robotics. — 2022. — Vol. 7, no. 66. — DOI: 10.1126/scirobotics.abm6695.
9. Tan Y.H., Chen B.M. A Morphable Aerial-Aquatic Quadrotor with Coupled Symmetric Thrust Vectoring // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). — Paris: IEEE, 2020. — Pp. 2223–2229.
10. Liu X., Dou Z., Xu L., Gao H., Peng F., Zheng H. TJ-FlyingFish: Design and Implementation of an Aerial-Aquatic Quadrotor with Tiltable Propulsion Units // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). — London: IEEE, 2023. — Pp. 7324–7330.
11. Bi Y., Yang Z., Xu G., Bai Y., Cai Z., Pan D., Guo T., Mao Z., Fang X., Yao G. Nezha-Mini: Design and Locomotion of a Miniature Low-Cost Hybrid Aerial Underwater Vehicle // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2022. — Vol. 7, no. 3. — Pp. 6669–6676. — DOI: 10.1109/LRA.2022.3176438.
12. Liu Y., Bai Y., Yang Z., Xu G., Song A., Yao G. WuKong: Design, Modeling and Control of a Compact Flexible Hybrid Aerial-Aquatic Vehicle // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2025. — Vol. 10. — Pp. 1417–1424.
13. Song A., Bai Y., Wang Z., Xu G., Yao G. Nezha-Morphing: Design and Experiments of a Seabird-Inspired HAUV // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). — Atlanta: IEEE, 2025. — DOI: 10.1109/ICRA.2025.11246152.
14. Xu G., Wang Z., Bai Y., Song A., Yang Z., Yao G. Nezha-Mb: Design and Implementation of a Morphing Hybrid Aerial-Underwater Vehicle // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2025. — Vol. 10, no. 1. — Pp. 261–268. — DOI: 10.1109/LRA.2024.3521659.
15. Bai Y., Wang Z., Yang Z., Xu G., Bi Y., Song A., Yao G. Nezha-F: Design and Analysis of a Foldable and Self-Deployable HAUV // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2023. — Vol. 8, no. 4. — Pp. 2309–2316. — DOI: 10.1109/LRA.2023.3252343.
16. Wang Z., Bai Y., Xu G., Song A., Yao G. Nezha-X: A Self-Foldable HAUV That Can Launch From a Tube // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2025. — Vol. 10, no. 5. — Pp. 6905–6912. — DOI: 10.1109/LRA.2025.3533446.
17. Yang Z., Li B., Xu G., Bai Y., Song A., Yao G. Design and Implementation of a Multimodal Tilt-Rotor Unmanned Aerial-Aquatic Vehicle // Journal of Field Robotics. — 2024. — Vol. 41, no. 8. — Pp. 1599–1618. — DOI: 10.1002/rob.22478.
18. Lyu C., Pan D., Bi Y., Xu G., Wang Z., Bai Y., Song A., Yao G. Nezha-SeaDart: A Tail-Sitting Fixed-Wing VTOL Hybrid Aerial Underwater Vehicle // Journal of Field Robotics. — 2024. — Vol. 41, no. 8. — Pp. 1656–1677. — DOI: 10.1002/rob.22399.
19. Siddall R., Kovač M. Wind and water tunnel testing of a morphing aquatic micro air vehicle // Interface Focus. — 2017. — Vol. 7, no. 1. — Art. 20160085. — DOI: 10.1098/rsfs.2016.0085.
20. Zhou H., Yao S., Zheng S., Jin L. Unmanned Aerial Underwater Vehicles: Research Progress and Prospects // Applied Sciences. — 2025. — Vol. 15, no. 22. — Art. 11868. — DOI: 10.3390/app152211868.

References

1. Qi H., Hu S., Zhang J., Wu G. Review of Hybrid Aerial Underwater Vehicle: Potential Applications in the Field of Underwater Marine Optics. Drones. 2025;9(10):667. DOI: 10.3390/drones9100667.
2. Yao G., Yang H., Mao Z., et al. Review of hybrid aquatic-aerial vehicle (HAAV): classifications, current status, applications, challenges and technology perspectives. Progress in Aerospace Sciences. 2023;139:100902. DOI: 10.1016/j.paerosci.2023.100902.
3. Weisler W., Stewart W., Anderson M., Peters K., Gopalarathnam A., Bryant M. Testing and Characterization of a Fixed Wing Cross-Domain Unmanned Vehicle Operating in Aerial and Underwater Environments. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2017;43(4):969–982. DOI: 10.1109/JOE.2017.2742798.
4. Guo D. Modelling and Experimental Investigations of a Bi-Modal Unmanned Underwater/Air System: Ph.D. Thesis. Melbourne: RMIT University; 2019.
5. Zha J., Siddall R., Mugica L., Kovač M. Towards Breaching a Still Water Surface with a Miniature Unmanned Aerial Underwater Vehicle. In: Proc. 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Atlanta: IEEE; 2019. Pp. 1178–1185.
6. Maia M.M., Mercado D.A., Diez F.J. Design and Implementation of Multirotor Aerial-Underwater Vehicles with Experimental Results. In: Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vancouver: IEEE; 2017. Pp. 961–966.
7. Witten P. AAU-drone can both fly and dive underwater. Aalborg University. 2025. Available at: https://www.energy.aau.dk/aau-drone-can-both-fly-and-dive-underwater-n145124 (accessed 01.06.2025).
8. Li L., Wang S., Liu F., et al. Aerial-aquatic robots capable of crossing the air-water boundary and hitchhiking on surfaces. Science Robotics. 2022;7(66). DOI: 10.1126/scirobotics.abm6695.
9. Tan Y.H., Chen B.M. A Morphable Aerial-Aquatic Quadrotor with Coupled Symmetric Thrust Vectoring. In: Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Paris: IEEE; 2020. Pp. 2223–2229.

10. Liu X., Dou Z., Xu L., Gao H., Peng F., Zheng H. TJ-FlyingFish: Design and Implementation of an Aerial-Aquatic Quadrotor with Tiltable Propulsion Units. In: Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). London: IEEE; 2023. Pp. 7324–7330.
11. Bi Y., Yang Z., Xu G., et al. Nezha-Mini: Design and Locomotion of a Miniature Low-Cost Hybrid Aerial Underwater Vehicle. IEEE Robotics and Automation Letters. 2022;7(3):6669–6676. DOI: 10.1109/LRA.2022.3176438.
12. Liu Y., Bai Y., Yang Z., Xu G., Song A., Yao G. WuKong: Design, Modeling and Control of a Compact Flexible Hybrid Aerial-Aquatic Vehicle. IEEE Robotics and Automation Letters. 2025;10:1417–1424.
13. Song A., Bai Y., Wang Z., Xu G., Yao G. Nezha-Morphing: Design and Experiments of a Seabird-Inspired HAUV. In: Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Atlanta: IEEE; 2025. DOI: 10.1109/ICRA.2025.11246152.
14. Xu G., Wang Z., Bai Y., Song A., Yang Z., Yao G. Nezha-Mb: Design and Implementation of a Morphing Hybrid Aerial-Underwater Vehicle. IEEE Robotics and Automation Letters. 2025;10(1):261–268. DOI: 10.1109/LRA.2024.3521659.
15. Bai Y., Wang Z., Yang Z., Xu G., Bi Y., Song A., Yao G. Nezha-F: Design and Analysis of a Foldable and Self-Deployable HAUV. IEEE Robotics and Automation Letters. 2023;8(4):2309–2316. DOI: 10.1109/LRA.2023.3252343.
16. Wang Z., Bai Y., Xu G., Song A., Yao G. Nezha-X: A Self-Foldable HAUV That Can Launch From a Tube. IEEE Robotics and Automation Letters. 2025;10(5):6905–6912. DOI: 10.1109/LRA.2025.3533446.
17. Yang Z., Li B., Xu G., et al. Design and Implementation of a Multimodal Tilt-Rotor Unmanned Aerial-Aquatic Vehicle. Journal of Field Robotics. 2024;41(8):1599–1618. DOI: 10.1002/rob.22478.
18. Lyu C., Pan D., Bi Y., et al. Nezha-SeaDart: A Tail-Sitting Fixed-Wing VTOL Hybrid Aerial Underwater Vehicle. Journal of Field Robotics. 2024;41(8):1656–1677. DOI: 10.1002/rob.22399.
19. Siddall R., Kovač M. Wind and water tunnel testing of a morphing aquatic micro air vehicle. Interface Focus. 2017;7(1):20160085. DOI: 10.1098/rsfs.2016.0085.
20. Zhou H., Yao S., Zheng S., Jin L. Unmanned Aerial Underwater Vehicles: Research Progress and Prospects. Applied Sciences. 2025;15(22):11868. DOI: 10.3390/app152211868.

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

Кулько Дмитрий Денисович, аспирант, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия, e-mail: Kulko-2001@mail.ru

Dmitrii D. Kulko, Graduate Student, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation, e-mail: Kulko-2001@mail.ru

Прощенко Дмитрий Юрьевич, кандидат физико-математических наук, директор научно-инновационного комплекса «Морской технопарк», Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского г. Владивосток, Россия, e-mail: dima.prsk@mail.ru

Dmitrii Yu. Proschenko, Ph.D. (Eng), Director of the Research and Innovation Complex "Marine Technopark", Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation e-mail: dima.prsk@mail.ru

Букин Олег Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия, e-mail: o_bukin@mail.ru

Oleg A. Bukin, Dr. Sci. (Phys & Math), professor, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation, e-mail: o_bukin@mail.ru

Статья поступила в редакцию / the article was submitted 10.07.2026.
Одобрена после рецензирования / approved after reviewing 17.08.2026.
Принята к публикации / accepted for publication 18.08.2026.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Научная статья
УДК 004.89/502.5
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.061

Формирование объяснимой интеллектуальной модели для оценивания причиненного вреда окружающей среде при разливах углеводородного сырья

Головацкая Л.И.[1] lesy_g@mail.ru**, Сорокин А.А.**[1,2] alsorokin.kimrt@mail.ru**,**
Пластинин А.Е.[1,3] plastininae@yandex.ru
[1]Каспийский институт морского и речного транспорта им. ген-адм. Ф.М. Апраксина – филиал Волжского государственного университета водного транспорта, [2]Астраханский государственный технический университет, [3]Волжский государственный университет водного транспорта, Россия

Аннотация. Актуальность статьи обусловлена значительным увеличением объемов добычи и транспортировки углеводородного сырья, что повышает риски аварийных разливов нефти и газового конденсата, негативно сказываясь на состоянии окружающей среды. Исследование направлено на создание модели оценки экологического вреда окружающей среде, учитывающих комплексный характер воздействия разливов на атмосферу, водные объекты, береговую линию и биологические ресурсы. Авторы предлагают теоретические положения к созданию интеллектуальной модели оценки ущерба от разливов углеводородного сырья. Модель основана на реализации нечеткой продукционной системы, предназначенной для обработки информации о параметрах, характеризующих состояние разлива углеводородного сырья. В ходе исследований предложены теоретические положения оценки экологического ущерба на базе идентификации четырёх основных ключевых параметров, отражающих разные виды негативного воздействия разливов углеводородов. Созданная модель позволяет классифицировать ситуации по степени тяжести экологического ущерба, которая позволяет облегчить выбор стратегии реагирования и управления ресурсами при ликвидации разлива углеводородного сырья. Полученные результаты открывают возможности дальнейшего развития инструментов для защиты окружающей среды при добыче и транспортировке углеводородного сырья. Статья предназначена для широкого круга исследователей, инженеров-экологов, менеджеров предприятий, занимающихся проблемами охраны окружающей среды и управления процессами, связанными с профилактикой и ликвидацией последствий аварийных ситуаций нефтегазовой отрасли.
Ключевые слова: экологический ущерб, углеводородное сырье, разливы углеводородного сырья, нефтепродукты, оценка ущерба, атмосферное загрязнение, экологическая безопасность.
Финансирование: Исследование выполнено в рамках реализации научно-исследовательского проекта по созданию Информационно-технологической платформы «Подъем и утилизация судов» для плавсредств внутреннего и смешанного (река-море) плавания (Шифр научной темы 06/ГЗ-2025-06-ПИУС) в части разработки научно-методического обеспечения оценки рисков нефтяного загрязнения при авариях буровых судов и установок, а также танкеров, перевозящих газовый конденсат.
Для цитирования: Головацкая Л.И., Сорокин А.А., Пластинин А.Е. Формирование объяснимой интеллектуальной модели для оценивания причиненного вреда окружающей среде при разливах углеводородного сырья, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 315—323. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.061

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.061

Formation of an explainable intellectual model for assessing the environmental damage caused by hydrocarbon spills

Lesya I. Golovatskaya[1] lesy_g@mail.ru**, Aleksandr A. Sorokin**[1,2] alsorokin.kimrt@mail.ru,
Andrey E. Plastinin[1,3] plastininae@yandex.ru
[1]Caspian Institute of Marine and River Transport named after Admiral F.M. Apraksin – branch of the Volga State University of Water Transport, [2]Astrakhan State Technical University, [3] Volga State University of Water Transport, Russia

Abstract. The relevance of this article stems from the significant increase in hydrocarbon production and transportation, which increases the risk of oil and gas condensate spills, negatively impacting the environment. This study aims to develop a model for assessing environmental damage that takes into account the complex impact of spills on the atmosphere, water bodies, coastlines, and biological resources. The authors propose theoretical principles for developing an intelligent model for assessing damage from hydrocarbon spills. The model is based on the implementation of a fuzzy production system designed to process information on parameters characterizing the state of a hydrocarbon spill. The research proposed theoretical principles for assessing environmental damage based on the

© Головацкая Л.И., Сорокин А.А., Пластинин А.Е. 2026

identification of four main key parameters that reflect different types of negative effects caused by hydrocarbon spills. The created model classifies situations by the severity of environmental damage, facilitating the selection of response strategies and resource management during hydrocarbon spill response. The obtained results open up opportunities for the further development of tools for environmental protection during the extraction and transportation of hydrocarbon raw materials. This article is intended for a wide range of researchers, environmental engineers, and managers working on environmental protection and process management issues related to the prevention and response to emergency situations in the oil and gas industry.
Key words: environmental damage, hydrocarbon raw materials, hydrocarbon spills, petroleum products, damage assessment, atmospheric pollution, environmental safety.
Financial Support: The research was carried out as part of a research project to create an information technology platform "Ship lifting and recycling" for inland and mixed (river-sea) navigation (Scientific topic code 06/GZ-2025-06-PIUS) in terms of developing scientific and methodological support for assessing the risks of oil pollution in drilling accidents vessels and installations, as well as tankers carrying gas condensate.
For citation: Lesya I. Golovatskaya, Aleksandr A. Sorokin, Andrey E. Plastinin. Formation of an explainable intellectual model for assessing the environmental damage caused by hydrocarbon spills. Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 315—323. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.061

Введение

Проблема ликвидации последствий разливов нефти становится всё острее ввиду увеличения интенсивности судоходства и эксплуатации месторождений полезных ископаемых в акваториях рек, морей и океанов. Интенсивно проводятся исследования и разрабатываются рекомендации как общего характера, направленные на улучшение системы компенсации экологического ущерба, так и специального правового регулирования, связанного с возмещением вреда, нанесённого природной среде вследствие аварийных выбросов нефти и нефтяных продуктов [1]. Изучаются типы сорбентов и способы их применения для оптимизации процессов очистки балластных вод и повышения уровня экологической безопасности водного транспорта и добывающей промышленности [2]. Современный этап исследований характеризуется активным применением специализированных программных комплексов для моделирования процессов, происходящих при разливах нефтепродуктов. Описаны основные этапы использования математического межмолекулярного моделирования при поиске противоядий к токсическим веществам для предупреждения негативных последствий развития нефтегазодобывающей деятельности [3]. Созданы расчётные зависимости для оперативного оценивания площади нефтяного загрязнения при аварийных разливах газового конденсата [4]. Особое внимание уделяется исследованиям, направленным на разработку теоретических моделей, реализованных в виде программных средств. Подобные модели позволяют анализировать распространение разливов газа при авариях на морских буровых установках [5-6]. Такие модели являются основой для детального анализа динамики распространения загрязнений, расчета потенциальных масштабов экологической катастрофы и разработки эффективных мер предупреждения и ликвидации последствий аварийных ситуаций, обеспечивая тем самым повышение уровня экологической безопасности и снижение негативного антропогенного воздействия на окружающую среду. Особенностью факторов, влияющих на уровень негативного влияния последствий, связанных с разливом углеводородного сырья, является их достаточно большое количество, разнородность, наличие скрытых закономерностей между ними. Наличие подобных свойств у учитываемых факторов вызывает сложности применения классических теоретических положений, в частотности, основанных на использовании аддитивных сверток.

Дополнительно, специфичность условий, в которых происходят аварийные ситуации осложняет процесс формирования репрезентативных выборок данных, необходимых реализации моделей основанных на использовании методов теории вероятностей и математической статистики. Таким образом, для формирования положений по прогнозированию оценки негативных последствий вреда окружающей среде при разливах углеводородного сырья целесообразно использование методов искусственного интеллекта. В виду высокой ответственности, принимаемых решений при использовании полученных оценок, предлагаемые теоретические положения должны предусматривать возможность объяснимости формируемых результатов.

1. Обзор предметной области оценивания причиненного вреда окружающей среде при разливах углеводородного сырья

Как отмечено в государственной программе РФ «Развитие энергетики», утв. Пост. Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. №321 «Энергетика Российской Федерации, основой которой является топливно-энергетический комплекс, вносит значительный вклад в национальную безопасность и социально-экономическое развитие страны … играет роль ключевого источника доходов бюджетной системы Российской Федерации». При этом как показывает практический опыт процесс транспортировки углеводородного сырья (в частности нефтепродуктов и газового конденсата) связан с рядом опасностей, в результате которых могут наступать аварийные ситуации с различной тяжестью последствий. Поэтому анализ вреда при разливах углеводородного сырья представляет собой критически важную процедуру, необходимую для разработки планов реагирования на чрезвычайные ситуации и обоснования управленческих решений.

Анализ вреда при разливах углеводородного сырья требует использования комплексного подхода, включающего тщательное исследование возможности возникновения разливов в различных эксплуатационных ситуациях, а также детальное рассмотрение потенциальных последствий таких инцидентов. Для случаев разливов с морских

транспортных средств особую значимость приобретает анализ частоты аварий, способных спровоцировать распространение углеводородного сырья. Последствия подобного рода аварий целесообразно оценивать посредством математического моделирования динамики движения разлитого вещества, позволяющего выявить зоны наибольшего воздействия и предсказать масштабы загрязнения окружающей среды, экономического ущерба и социально-медицинских угроз населению прибрежных зон.

Таким образом, адекватная оценка опасности разлива углеводородного сырья должна учитывать широкий спектр факторов: от технических характеристик перевозимого груза и состояния инфраструктуры до климатических условий и плотности заселенности прилегающих территорий. Подобное позволяет сформировать объективную картину существующих угроз и разработать меры минимизации возможного негативного влияния разливов углеводородного сырья на окружающую среду и население.

Формирование комплексной оценки степени урона природной среде вследствие разливов углеводородного сырья является сложной задачей, требующей учета множества аспектов экосистемы и взаимодействия компонентов окружающей среды. Предлагаемые теоретические положения систематизируют этот процесс, вводя четыре ключевых параметра, каждый из которых отражает специфику экологической уязвимости конкретных сред и объектов природы. Учитываются такие параметры оценки вреда окружающей среде, как:

- оценка опасности причинения вреда атмосфере. Данный показатель характеризует степень поражения атмосферного воздуха в результате испарения углеводородов и выделения токсичных соединений, возникающих при пожаре или взрывах, учитывает скорость распространения загрязнений, интенсивность выбросов загрязняющих веществ и их способность воздействовать на состояние атмосферы, влияя на качество воздуха и вызывая негативные изменения климата;

- оценка опасности причинения вреда биоресурсам. Параметр предназначен для измерения уровня опасности повреждения живых организмов и природных ресурсов, находящихся в зоне воздействия разлива углеводородов. Здесь учитываются эффекты гибели флоры и фауны, нарушения пищевых цепочек, снижение репродуктивной способности видов и ухудшение качества естественных кормовых баз водных и наземных обитателей;

- оценка опасности причинения вреда береговой черте. Показатель описывает уровень угрозы побережью, находящемуся вблизи места аварии. Это связано с возможным загрязнением почвенных покровов, разрушением прибрежных экосистем, эрозионными процессами и изменением гидродинамического режима водоемов, оказывая негативное влияние на устойчивость береговой линии и сохранность ценных ландшафтов.

- оценка опасности причинения вреда водному объекту. Значение служит индикатором масштабов загрязнения водного объекта углеводородами, которое проявляется в изменении физико-химического состава воды, снижении её прозрачности, насыщении тяжелыми металлами и иными токсичными веществами. Высокое значение показателя свидетельствует об опасности уничтожения подводных растений и животных, ухудшении качества питьевой воды и нарушении рекреационного потенциала водоема.

Комплексная интеграция указанных показателей позволит создать систему комплексного мониторинга экологических последствий разливов углеводородного сырья, обеспечить разработку надежных механизмов предупреждения аварий и минимизировать негативные последствия для нанесения и экосистем региона, в котором ведется добыча и/или транспортировка различных видов углеводородного сырья.

2. Модель для оценки причиненного вреда окружающей среде при разливах углеводородного сырья

С учетом анализа [7, 8] для формирования оценки причинения вреда окружающей среде при разливах углеводородного сырья $y_{\text{ПВ}}$(англ. y_{DC} – the assessment of environmental damage caused by hydrocarbon spills) предлагается набор параметров: x_{BA} – оценка опасности причинения вреда атмосфере (англ. x_{DHA} – the danger assessment of harm to the atmosphere); $x_{ВБ}$ – оценка опасности причинения вреда биоресурсам (англ. x_{DHBR} – the danger assessment of harm to biological resources); $x_{ВБч}$ – оценка опасности причинения вреда береговой черте (англ. x_{DHC} – the danger assessment of harm to coastline); $x_{ВВ}$ – оценка опасности причинения вреда водному объекту (англ. x_{DHWO} – the danger assessment of harm to a water object). Для описания переменных используется шкала рангов в диапазоне от 0 до 100 ед. Обобщенно определение оценки $y_{\text{ПВ}}$ можно представить в виде:

$$y_{\text{ПВ}} = F_{\text{ПВ}}(x_{\text{ВА}}, x_{\text{ВБ}}, x_{\text{ВБч}}, x_{\text{ВВ}}) \quad (1)$$

где $F_{\text{ПВ}}$ – оператор для обработки переменных $x_{\text{ВА}} \div x_{\text{ВВ}}$. Переменные $x_{\text{ВА}} \div x_{\text{ВВ}}$ описываются на шкале рангов и формируются экспертами, на основании анализа информации о специфике загрязнения, например крушения танкера, утечки нефтепродуктов и т.д. Привлечение экспертов связано с высокой неопределенностью влияния факторов на специфику загрязнения, особенности его распространения и тяжесть последствий. Как известно из [9] особенность шкалы рангов (шкалы порядков) – возможность использования операций сравнения, что делает невозможным применение аддитивных сверток для реализации $F_{\text{ПВ}}$. Так же параметры $x_{\text{ВА}} \div x_{\text{ВВ}}$ оказывают неравномерное влияние на итоговый результат оценки.

Анализ [10, 11] показывает, что для обработки информации, получаемой от экспертов и параметров, которые оказывают различное влияние на итоговый результат, распространение получили методы, основанные на формировании нечетких продукционных систем (НПС). Как описывается в [10] НПС можно представить в виде модели:

$$\text{M}_{\text{НПС}} =< X, Y, \text{M}_{\text{x}}, \text{M}_{\text{y}}, \text{R}, \text{A} >, \quad (2)$$

где $X = \{x_n\}: n = \overline{1,N}$ и $Y = \{y_k\}: k = \overline{1,K}$ – множества входных и выходных переменных; $\text{M}_{\text{x}} = \{\mu_{x,t_x}(x)\}: t_x = \overline{1,T_x}, \text{M}_{\text{y}} = \{\mu_{y,t_y}(y)\}: m_y = \overline{1,T_y}$ – функции принадлежности (ФП) – $\mu_{x,t_x}(x)$ или $\mu_{y,t_y}(y)$, предназначенные для преобразования переменных к

виду удобному для обработки в НПС;$\mathrm{R} = \{r_q\}: q = \overline{1,Q}$ – правила, описывающие преобразование определенных диапазонов значений переменных из множества X в диапазоны значений переменных их множества Y;A – алгоритмы функционирования НПС.

С учетом (2) переменные $x_n \in X$ и $y_k \in Y$ можно представить в виде:

$$x_n = < sc_{x_n}, \mu_{x_n,t_{x_n}}(x_{\text{вх.n}}), t_{x_n} >, \quad (3)$$

$$y_k = < sc_{y_k}, \mu_{y_k,t_{y_k}}(y_{\text{вых.k}}), t_{y_k} >, \quad (4)$$

где $x_{\text{вх.n}}$ и $y_{\text{вых.k}}$ – численные значения входных и выходных переменных; sc_{x_n} и sc_{y_k} – шкалы, на которых откладываются диапазоны их значений, t_{x_n} и t_{y_k} – термы, которые семантически описывают состояние переменных, $\mu_{x_n,t_{x_n}}(x_{\text{вх.n}})$ и $\mu_{y_k,t_{y_k}}(y_{\text{вых.}k})$ – ФП которые описывают степень истинности того, что численное значение переменных $x_{\text{вх.}n}$ или $y_{\text{вых.}k}$ соответствует определенному семантическому значению термов t_{x_n} или t_{y_k}.Область определения ФП формируется с учетом специфики переменных. Область значения ФП изменяется от 0 до 1, где 0 означает, что заданное значение переменной не соответствует семантическому значению терма, а 1 означает полное соответствие заданного значения переменной его семантическому значению. ФП описываются при помощи трапецеидальных, треугольных, гауссовых и др. видов закономерностей. Выбор вида закономерности осуществляется экспертной группой, которая формирует НПС.

Переменные $x_{\text{ВА}} \div x_{\text{ВВ}}$ предлагается описать при помощи терм множества:

$$T_{x_{\text{ВА}} \div x_{\text{ВВ}}} = \{t_{1,x_{\text{ВА}} \div x_{\text{ВВ}}} = NB_x, t_{2,x_{\text{ВА}} \div x_{\text{ВВ}}} = M_x, t_{3,x_{\text{ВА}} \div x_{\text{ВВ}}} = PB_x\} \quad (5)$$

где NB_x – низкое, M_x – среднее, а PB_x – высокое значение оценок опасности причинения вреда. Для описания термов (5) предлагается использовать трапециевидные ФП, которые показаны на рис. 1. Форма ФП выходных переменных определяется спецификой алгоритма нечеткого вывода.

Правило $r_q \in \mathrm{R}$, с учетом [10, 11] и (1) можно описать в виде:

$$r_q: f_{\text{акт.}r_q}[f_{\text{агр.}r_q}(x_{\text{ВА}}, x_{\text{ВБ}}, x_{\text{ВБЧ}}, x_{\text{ВВ}}) \Rightarrow Y_q, \xi_{r_q}], \quad (6)$$

где $f_{\text{агр.}r_q}$ – оператор по агрегированию переменных $x_{\text{ВА}} \div x_{\text{ВВ}}$, $f_{\text{акт.}r_q}$ – оператор для активации правил, с учетом значения коэффициента доверия (КД) $\xi_{r_q} \in [0,1]$, Y_q – значения выходных переменных. МножествоR образует базу правил (БП).

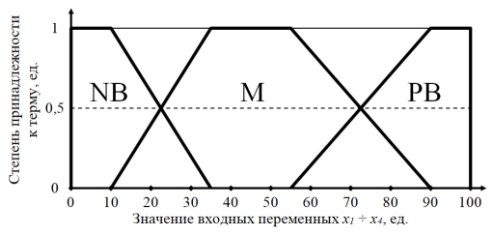


Рис. 1. Функции принадлежности для описания входных переменных $x_1 \div x_4$

В условиях, когда правила формируются группой экспертов, между экспертами могут возникать противоречия, в результате чего в БП могут попадать несовместимые правила (НП). Под НП понимаются соотношения вида (6), которые имеют одинаковую часть, описывающую поведение входных переменных, и разную часть с описанием значений выходных переменных. С учетом анализа [10, 12] можно выделить два метода обработки БП с НП. Первый метод основан на оставление в БП, только тех правил, которые имеют максимальное значение КД. Подобная операция в [10] описывается как «метод выбора доминирующих заключений». Во втором методе [12] значение КД определяется как отношение количества экспертов, которые поддержали это правило к общему количеству экспертов, которые принимают участие в формировании БП. Сумма КД внутри одной группы НП равна 1.В [10] такие БП относятся к реляционными. Анализ [10, 12] показывает, первый метод позволяет сформировать правила, которые поддержали большинство экспертов в группе, а второй – сформировать «взвешенное» мнение экспертной группы.

Совокупность из БП, множества ФП, шкал и термов образуют базу знаний (БЗ) НПС. С учетом (1) – (6) формирование выходного значения НПС представляется в виде:

$$F_{\text{НПС}}{}_{q=1}^{Q}\left(\begin{matrix} f_{\text{акт.}r_q}[f_{\text{агр.}r_q}(x_{\text{ВА}}, x_{\text{ВБ}}, x_{\text{ВБЧ}}, x_{\text{ВВ}}) \\ \Rightarrow Y_q, \xi_{r_q}] \end{matrix}\right) = Y, \quad (7)$$

где $F_{\text{НПС}}$ – оператор для аккумулирования значений правил и дефаззификации выходного значения НПС. В рамках исследований, с учетом [10, 11], правила (6) в составе (7) имеют структуру MISO (много входных, одна выходная переменная).

Перечень математических операций используемых для реализации операторов $f_{\text{агр.}r_q}$, $f_{\text{акт.}r_q}$, и $F_{\text{НПС}}$ определяется алгоритмом нечеткого вывода. В рамках исследований для обработки информации используется алгоритм Сугено (АС), его формальная реализация описывается в [11]. АС широко апробирован, что подтверждается его реализацией в программных пакетах как MATLAB, FuzzyTech и т.д. АС основан на использовании операций «И», «ИЛИ», определения минимума, вычисления взвешенных сумм и т.д., что позволяет проследить последовательность преобразований значений входных параметров в выходную переменную, это в совокупности с понятной структурой правил, входящих в БЗ обуславливает объяснимость моделей, основанных на использовании НПС [13, 14].

Одной из особенностей АС является использование полиномов для описания ФП выходной переменной. В рамках исследований предлагается использование полиномов 0-го порядка. Таким образом, для описания $y_{\text{ПВОС}}$предлагается следующий набор термов:

$$T_{y_{\text{ПВ}}} = \{t_{1,y_{\text{ПВ}}} = NB_y, t_{2,y_{\text{ПВ}}} = NM_y, t_{3,y_{\text{ПВ}}} = M_y, t_{4,y_{\text{ПВ}}} = PM_y, t_{5,y_{\text{ПВ}}} = PB_y\} \quad (8)$$

где NB_y – низкое, NM_y – скорее низкое, M_y – среднее, PM_y – скорее высокое, а PB_y – высокое значение оценки опасности причинения вреда природе при разливе углеводородного сырья. Для описания термов (8) предлагается следующий набор ФП в виде полиномов 0-го порядка: $NB_y \Leftrightarrow 0$, $NM_y \Leftrightarrow 25$, $M_y \Leftrightarrow 50$, $PM_y \Leftrightarrow 0$ и $PB_y \Leftrightarrow 100$ ед.

Особенностью работы «классической» НПС является формирование некоторого значения

выходной оценки из заданного диапазона (в рамках исследования от 0 до 100 ед.). Тогда как в рамках (1) целесообразно выделять определенные классы состояния по уровню опасности причинения вреда окружающей среде. Поэтому необходимо реализовать классификатор состояний, в результате работы которого выходная переменная ассоциируется с меткой класса. Предлагается пять классов опасности:

$$Y_{\text{класс}} = < y_{\text{ПВ.кл.1}}, y_{\text{ПВ.кл.2}}, y_{\text{ПВ.кл.3}}, y_{\text{ПВ.кл.4}}, y_{\text{ПВ.кл.5}}, > \quad (9)$$

где $y_{\text{ПВ.кл.1}}$ низкий, $y_{\text{ПВ.кл.2}}$ – скорее низкий, $y_{\text{ПВ.кл.3}}$ – средний, $y_{\text{ПВ.кл.4}}$ – скорее высокийи $y_{\text{ПВ.кл.5}}$ – высокий. От метки класса зависит формирование набора действий для устранения последствий причинного вреда и оперативность их применения.

В [15] показано, что многократное использование однотипной НПС позволяет реализовать классификатор состояния. При этом (а) в правилах НПС значение терма выходной переменной должно соответствовать минимальному семантическому значению термов, используемых для описания входных переменных; (б) для описания входных переменных должны использоваться трапециевидные ФП, а для описания выходных – полиномы 0-го порядка; (в) на вход должны подаваться минимум две переменных. Реализация многократного использования НПС возможна при помощи цикла While. Цикл завершается при условии присвоения объекту анализа метки класса, или превышении некоторого числа его повторов. Второе условие необходимо для предотвращения зацикливания, если не получается присвоить объекту метку класса. В этом случае считается, что формируется новый класс состояния, и при необходимости возможно формирование дополнительных правил, соотнесения подобного числа с существующими классами состояния.

В состав НПС, предназначенной для классификации опасности причинения вреда окружающей среде, предлагается включить две входных переменных, значения которых будут равны выходному значению НПС, которая агрегирует переменные $x_{\text{ВА}} \div x_{\text{ВВ}}$. ФП входных переменных классифицирующей НПС показаны на рис. 2.

Для описания ФП выходных переменных используется набор термов аналогичный (8), а их семантические значения аналогичны меткам классов, приведенных в (9).

С учетом (1) – (9) структура модели для оценивания опасности причинения вреда окружающей среде при разливе углеводородного сырья показана на рис. 3, где $y_{\text{ПВ.агр}}$, переменная, которая получается на выходе НПС, которая агрегирует входные переменные.

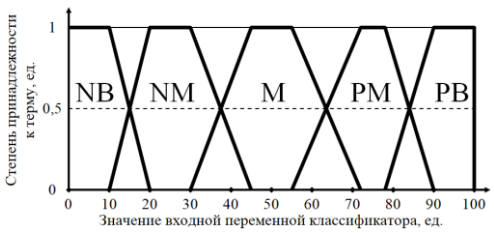


Рис. 2. Функции принадлежности для описания входных переменных классификатора

Параметр $y_{\text{ПВ.агр}}$ может использоваться при объяснении причин формирования определенной выходной оценки $y_{\text{ПВ}}$.

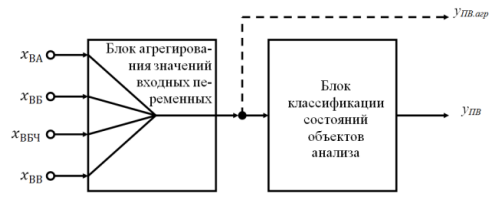


Рис. 3. Структура модели для оценивания опасности причинения вреда окружающей среде

Предложенные положения описывают модель для оценки причиненного вреда окружающей среде при разливах углеводородного сырья. Структура модели и используемые в ней теоретические положения позволяют объяснить, каким образом был получен определенный результат в зависимости от комбинации значений входных параметров. Учитывая, что каждое правило является персонифицированным относительно эксперта, который его предложил, то анализ результата модели позволяет установить мнения конкретно каких экспертов, повлияли на формирование итоговой оценки, сформированной моделью.

3. Исследование модели для оценки опасности причиненного вреда окружающей среде

Предложенные положения анализировалась в части соотнесения выявленной ситуации с определенным классом состояния, а также сравнивались результаты моделей, БП которых содержат или не содержат несовместимые правила. Для этого значения входных переменных формируются в виде последовательности случайных величин из допустимого диапазона величин. Всего сформировано 653 комбинации значений входных параметров.

Для формирования БП НПС в блоке агрегирования были привлечены 5 экспертов в области оценки ущерба окружающей среде наносимого разливами углеводородного сырья. Для экспертов были сформированы перечни комбинаций термов входных переменных. С учетом количества термов и переменных перечни содержали 81 запись с их возможными комбинациями. Эксперты указывали значения термов выходных переменных. После этого были сформированы две БП. БП_1 содержала 81 группу правил, внутри каждой группы находилось от 1 до 3 правил. Если в группе находилось одно правило, то его КД равнялся единице. Если в группе находилось 2 или 3 правила, то их КД определялись как отношение количества экспертов предложивших эти правила к общему количеству экспертов, сумма КД правил в этих группах равнялась 1. В БП_2 правила сформированы по методу выбора доминирующих заключений, а их КД равнялись 1. В рамках каждого из этапов сравнивалось две модели. Модель 1 использовала для агрегации входных переменных НПС с БП_1, модель 2 – НПС с БП_2. В блоке классификации НПС были одинаковы.

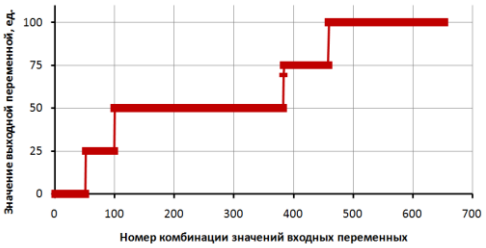
Результаты эксперимента показаны на рис. 4. Закономерность изменения $y_{\text{ПВ}}$ модели 1, показана

на рис. 4 а., а закономерность изменения $y_{ПВ}$ у модели 2 – на рис. 4б.

Коэффициент корреляции между закономерностями, показанными на рис. 4 а. и 4 г. равен 0,979, а между закономерностями на рис. 4б. и 4 г. – 0,953, что так же говорит об их идентичности. Количество объектов, распределенных по классам, показаны в табл. 1.



а.



б.

Рис. 4. Результат выполнения второго этапа моделирования

Как видно из табл. 1 аналогично результатам, полученным в рамках первого этапа, модель 2 так же обладает большей «строгостью», чем модель 1. В табл. 2 приведено количество совпадений и различий оценок между моделями.

Таблица 1.

Объекты, распределенные по классам состояния в ходе второго этапа эксперимента

Метки классов состояния	Ситуации отнесенные с классами состояния	
	База правил с НП (модель 1)	База правил без НП (модель 2
Низкий класс опасности	41	51
Скорее низкий класс опасности	72	48
Средний класс опасности	274	283
Скорее высокий класс опасности	103	75
Высокий класс опасности	163	195

Таблица 2.

Отличия и совпадения результатов моделей на втором этапе эксперимента

Выходное значение модели 2	Выходное значение модели 1		
	Случаи совпадения результатов	Случаи более благоприятного прогноза	Случаи менее благоприятного прогноза
Низкий класс опасности	40	-	в 11 случаях присвоена метка 25 (скорее низкий класс опасности)
Скорее низкий класс опасности	45	в 1 случае присвоена метка 0 (низкий класс опасности)	в 2 случаях присвоена метка 50 (средний класс опасности)
Средний класс опасности	256	в 16 случаях присвоена метка 25 (скорее низкий класс опасности)	в 11 случаях присвоена метка 75 (скорее высокий класс опасности)
Скорее высокий класс опасности	58	в 16 случаях присвоена метка 50 (средний класс опасности)	в 1 случае присвоена метка 100 (высокий класс опасности)
Высокий класс опасности	162	в 33 случаях присвоена метка 75 (скорее высокий класс опасности)	-

4. Реализация поддержки принятия решений при оценивании опасности причиненного вреда окружающей среде на основе предложенных моделей

Анализ табл. 2 показывает, что 86 % случаев результаты, сформированные моделями, совпадают, а возникающие отличия говорят о спорности оцениваемой ситуации. Для анализа ситуации, лицу, принимающему решения (ЛПР) предлагаются следующие оценки: оптимистичная $y_О = \min(y^{М1}_{ПВ.к}, y^{М2}_{ПВ.к})$, взвешенного мнения $y_{ВМ} = y^{М1}_{ПВ.к}$, доминирующего мнения $y_{ДМ} = y^{М2}_{ПВ.к}$, пессимистичная $y_П = \max(y^{НП}_{ПВ.к}, y^{бНП}_{ПВ.к})$. Обобщенно набор оценок, направляемый ЛПР, имеет вид:

$$Y_{ЛПР} = \{y_О, y_{ВМ}, y_{ДМ}, y_П\} \quad (10)$$

Пример распределения оценок по результатам эксперимента показан в табл. 3.

Таблица 3.

Пример распределения оценок по результатам эксперимента

$y_О$ – оптимистичная оценка	$y_{ВМ}$ – оценка взвешенного мнения	$y_{ДМ}$ – оценка доминирующего мнения	$y_П$ – пессимистичная оценка
25	25	50	50
50	75	50	75
25	50	25	50
50	50	75	75
50	75	50	75
75	75	100	100

Принятие решения проводится на основании прогнозирования двух видов потерь. Первый вид потерь возникает, если реальная опасность представляла меньшую угрозу, в результате назначаются избыточные мероприятия по ликвидации последствий разлива нефтепродукта. Второй вид потерь происходит, если принятие решения опирается на излишне оптимистичную оценку, следствием чего становится недостаточность выделенных ресурсов на ликвидацию разлива. Решение о выборе варианта прогнозирования основывается на экологической политике, выбранной организацией, администрирующей акваторию. В рамках проводимых исследований рекомендуется из пессимистического сценария, в результате чего ошибка первого рода принимается как допустимая: «Лучше потратить дополнительные ресурсы на ликвидацию, чем допустить масштабный ущерб экосистемам».

Как показывает анализ, при использовании подобного сценария, для компенсации избыточных потерь с учетом [16, 17] процесс ликвидации загрязнения предлагается рассматривать как проект. В [17] под проектом понимается «ограниченное во времени целенаправленное изменение отдельной системы с установленными требованиями к качеству результатов, возможными рамками расхода средств и ресурсов и специфической организацией». Сам процесс ликвидации загрязнения можно разделить на этапы, в рамках которых будет оцениваться промежуточная эффективность мероприятий в плане затраченных ресурсов, достигнутых результатов и динамики развития ситуации с распространением загрязнения. По результатам анализа ЛПР будет решать о необходимости привлечения дополнительных ресурсов или их сокращении.

Предложенные положения зарегистрированы в виде объектов интеллектуальной собственности как «Нечеткая продукционная система для оценки вреда при разливах углеводородного сырья» (в виде программы для ЭВМ [18]) и «База правил для оценки вреда при углеводородных разливах» (в виде базы данных [19]).

Заключение

Проведённое исследование позволило сформулировать объясняемую интеллектуальную модель для оценки вреда причиненного экосистемам региона, где произошел разлив углеводородного сырья. Формирование оценки вреда причиненного экосистемам региона основано на учете факторов, связанных с оценкой опасности причинения вреда атмосфере, оценка опасности причинения вреда биоресурсам, оценкой опасности причинения вреда береговой черте и оценкой опасности причинения вреда водному объекту. Выходным значением модели является метка класса опасности, с которой соотносится оцениваемая ситуация. Всего ситуации могут быть соотнесены с пятью классами опасности: низкий, скорее низкий, средний, скорее высокий и высокий. Учитывая нелинейный характер влияния каждого из агрегируемых параметров на общую величину оценки вреда причиненного экосистемам региона, а также необходимость объяснять полученный результат для обработки этих переменных предложено использовать положения теории нечетких множеств и нечеткого логического вывода, на основании которых формируется нечеткая продукционная модель. Спецификой предложенной модели является наличие базы продукционных правил, в которой обобщен опыт экспертной группы. В состав такой группы включены специалисты в области оценки последствий разливов углеводородного сырья. Спецификой сформированной базы правил является учет мнений всех членов группы. В результате этого НПС формирует оценки: оптимистическую, взвешенную, доминирующего мнения и пессимистическую. После чего эти оценки соотносятся с определенным классом опасности. Дополнительно оценка подкрепляется объяснением причин формирования определенного значения. Под объяснением понимается перечень правил с уровнем их значимости и перечнем экспертов, которые их предложили. В результате модель предлагает ЛПР различные виды последствий развития ситуации, связанной с разливом нефтепродуктов. После чего ЛПР, в зависимости от принятого сценария реагирования на сложившуюся ситуацию выбирает набор, действий, для ликвидации случившегося разлива.

Результаты проведенных исследований открывают возможности дальнейшего развития систем автоматизированного управления процессами ликвидации загрязнений окружающей среды, возникших по причине разливов углеводородного сырья в процессе их добычи или транспортировки.

Литература

1. Шапошников, А. Д. Оценка экологических последствий взрывов при разливах нефтепродуктов в Московском бассейне с применением цифровых технологий / А. Д. Шапошников // Каспийский научный журнал. – 2025. – № 1(6). – С. 55-65. – EDN FCDXEU.
2. Эффективность метода сорбции при поиске очистителей к химическим загрязнителям балластных вод / А. Н. Цыгута, Л. И. Головацкая // Каспийский научный журнал. – 2025. – № 1(6). – С. 2-9.
3. Молекулярное моделирование при поиске антидотов к сероводороду для предупреждения последствий разливов газового конденсата / Л. И. Головацкая // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 11. – С. 29-36.
4. Оценка площади нефтяного загрязнения при разливах газового конденсата в Каспийском море / Л. И. Головацкая, А. Н. Бородин, А. Е. Пластинин // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 2-1(60). – С. 315-319.
5. Прогнозирование и оценка загрязнения Каспийского моря в районе острова Чечень при разливах газового конденсата на основе модели Лагранжа / Л. И. Головацкая, А. Е. Пластинин, А. Н. Бородин // Безопасность труда в промышленности. – 2025. – № 8. – С. 33-38.

6. Прогнозирование разливов нефти с судов в Амурском бассейне / А. Н. Каленков, А. Е. Пластинин // Научные проблемы водного транспорта. – 2023. – № 74. – С. 216-228.
7. Разработка базы данных по загрязняющим веществам с учетом эффективности противоядий / А. Н. Цыгута, Л. И. Головацкая, А. Е. Пластинин // Безопасность жизнедеятельности. – 2024. – № 7(283). – С. 34-41.
8. Молекулярное моделирование и экспериментальное подтверждение поиска средств коррекции токсического воздействия сероводорода / Л. И. Головацкая, Е. В. Тризно, Ю. А. Смирнова, М. Н. Тризно // Медицина экстремальных ситуаций. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 37-43.
9. Определение важности факторов для оценки объектов жилой недвижимости методом экспертных оценок /О.И. Пятковский, Л.В. Лютова // Ползуновский вестник. 2011. № 1, С. 171—176.
10. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. пер. с англ. – 3-е изд. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 801 с.
11. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTech. // СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
12. Сорокин А.А. Формирование базы правил системы нечеткого вывода в условиях несогласованных мнений экспертов // Управление большими системами: сборник трудов. 2019. № 81. С. 26-49.
13. Реализация метода формирования комплексной оценки предпочтения выбора компонентов фильтра балластных вод на основе положений нечеткого логического вывода / Л. И. Головацкая, А. А. Сорокин, А. Н. Цыгута [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – № 4-2(66). – С. 147-158. – DOI 10.37220/MIT.2024.66A.071. – EDN MXRRDG.
14. Сорокин А.А., Тризно Е.В., Головацкая Л.И., Пластинин А.Е., Новочадов В.В. Интеллектуальная поддержка принятия решений при оценке уровня нагрузки на гуморальный иммунитет работников водного транспорта с использованием положений теории нечеткого логического вывода, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 1, С. 233—244. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.051.
15. Сорокин А.А. Исследование иерархических систем нечеткого вывода при получении интегральных оценок анализируемых объектов // Информационные технологии. 2021. Т. 27. № 11. С. 582-591.
16. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Как управлять проектами: Научно-практическое издание. М.: Синтег– Гео, 1997. 188 с.
17. Матвеев А.А., Новиков Д.А., Цветков А.В. Модели и методы управления портфелями проектов. М.:ПМСОФТ, 2005. 206 с.
18. Головацкая Л.И., Сорокин А.А., Пластинин А.Е. Нечеткая продукционная система для оценки вреда при разливах углеводородного сырья // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025669167, 23.07.2025. Заявка № 2025667284 от 18.06.2025.
19. Головацкая Л.И., Пластинин А.Е., Сорокин А.А. База правил для оценки вреда при углеводородных разливах // Свидетельство о регистрации базы данных RU 2025622376, 30.05.2025. Заявка № 2025621877 от 14.05.2025.

References

1. Shaposhnikov A.D. Assessment of the environmental consequences of explosions during oil product spills in the moscow basin using digital technologies // The Caspian Scientific Journal. 2025. no 1(6). pp. 55-65.
2. Tsyguta A.N., Golovatskaya L.I. The effectiveness of the sorption method in the search for purifiers for chemical pollutants in ballast water // The Caspian Scientific Journal. 2025. no 1(6). pp. 2-9.
3. Golovatskaya L.I. Molecular modeling in search for antidotes to hydrogen sulfide to prevent the consequences of gas condensate spills // Occupational safety in industry. 2024. no 11. pp. 29-36. doi: 10.24000/0409-2961-2024-11-29-36
4. Golovatskaya L.I., Borodin A.N., Plastinin A.E. Assessment of the area of oil pollution from gas condensate spills in the caspian sea // Marine intellectual technologies. 2023. no 2-1(60). pp. 315-319. doi: 10.37220/MIT.2023.60.2.039
5. Golovatskaya L.I., Plastinin A.E., Borodin A.N. Forecasting and assessing contamination of the caspian sea in the area of the chechen island during gas condensate spills based on the lagrange model // Occupational safety in industry. 2025. no 8. pp. 33-38. doi: 10.24000/0409-2961-2025-8-33-38
6. Kalenkov A.N., Plastinin A.E. Forecasting of oil spills from ships in the amur river basin // Russian journal of water transport. 2023. no 74. pp. 216-228. doi: 10.37890/jwt.vi74.341
7. Tsyguta A.N., Golovatskaya L.I., Plastinin A.E. Development of a database on pollutants taking into account the effectiveness of antidotes // Bezopasnost' Zhiznedeatel'nosti. 2024. no 7(283). pp. 34-41.
8. Golovatskaya L.I., Trizno E.V., Smirnova Yu.A., Trizno M.N. Molecular modeling and experimental confirmation of the search for agents mitigating toxic action of hydrogen sulfide // Medicine of extreme situations. 2023. Vol. 25, no 1. pp. 37-43. doi: 10.47183/mes.2023.007
9. Pyatkovskij O.I., Lyutova L.V. Determining the importance of factors for assessing residential real estate by the method of expert assessments [Opredelenie vazhnosti faktorov dlya ocenki ob`ektov zhiloj nedvizhimosti metodom e`kspertny`x ocenok] // Polzunovskiy vestnik. 2011. no 1, pp. 171—176.
10. Pegat A. Fuzzy Modeling and Control [Nechetkoe modelirovanie i upravlenie]. trans. from Eng, 3rd ed. Moscow: BINOM, Knowledge Laboratory, 2015, 801 p.
11. Leonenkov A.V. Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTech [Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTech]. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2005. 736 p.
12. Sorokin A. Development of rules base for a fuzzy inference system in the conditions of unharmonious experts opinion // Large-scale systems control. – 2019. – no 81. pp. 26-49. DOI: 10.25728/ubs.2019.81.2

13. Golovackaya L.I., Sorokin A.A., Tsyguta A.N., Plastinin A.E., Otdelkin N.S. Implementation of a method for forming a comprehensive assessment of the preference for the selection of ballast water filter components based on the provisions of a fuzzy logical conclusion // Marine intellectual technologies. 2024. no 4-2(66). pp. 147-158. doi 10.37220/MIT.2024.66A.071.
14. Sorokin A.A., Trizno E.V., Golovatskaya L.I., Plastinin A.E., Novochadov V.V. Intelligent decision support for assessing the level of load on the humoral immunity of water transport workers using the principles of fuzzy logic theory // Marine intellectual technologies. 2025. no 4(1), pp. 233 244. doi: 10.37220/MIT.2025.70.4.051.
15. Sorokin A.A. Investigation of hierarchical fuzzy inference systems, when obtaining integral estimates of the analyzed objects // Information technologies. 2021. Vol. 27. no 11. pp. 582-591. doi: 10.17587/it.27.582-591
16. Burkov V.N., Novikov D.A. How to manage projects: Scientific and practical publication [Kak upravlyat` proektami: Nauchno-prakticheskoe izdanie]. M.: Sinteg-Geo, 1997. 188 p.
17. Matveev A.A., Novikov D.A., Tsvetkov A.V. Models and methods of project portfolio management [Modeli i metody` upravleniya portfelyami proektov]. M.: PMSOFT, 2005. 206 p.
18. Golovatskaya L.I., Sorokin A.A., Plastinin A.E. Fuzzy production system for assessing damage from hydrocarbon spills [Nechetkaya produkcionnaya sistema dlya ocenki vreda pri razlivax uglevodorodnogo sy`r`ya] // Certificate of registration of computer program RU 2025669167, 23.07.2025. Application No. 2025667284, 18.06.2025.
19. Golovatskaya L.I., Plastinin A.E., Sorokin A.A. Database of rules for assessing damage from hydrocarbon spills [Baza pravil dlya ocenki vreda pri uglevodorodny`x razlivax // Svidetel`stvo o registracii bazy` danny`x] // Certificate of registration of database RU 2025622376, 05.30.2025. Application No. 2025621877, 14.05.2025.

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.

ИНФОРМАЦИЯОБАВТОРАХ / INFORMATIONABOUTTHEAUTHORS

Головацкая Леся Ивановна, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Математические и естественнонаучные дисциплины», Каспийский институт морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф.М. Апраксина – филиал Волжского государственного университета водного транспорта, 414000, г. Астрахань, ул. Никольская, 6, e-mail: lesy_g@mail.ru

Lesya I. Golovatskaya, Ph.D. (Eng), assistant professor, Professor of the Department «Mathematical and natural science disciplines», The Caspian Institute of Sea and River Transport named after Gen.-Adm. F. M. Apraksin is a branch of the Volga State University of Water Transport, st. Nikolskaya, 6, Astrakhan city, 414000, Russian Federation, e-mail: lesy_g@mail.ru

Сорокин Александр Александрович, кандидат техническихнаук, доцент, доцент кафедры «Математические и естественнонаучные дисциплины», Каспийский институт морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф.М. Апраксина – филиал Волжского государственного университета водного транспорта, 414000, г. Астрахань, ул. Никольская, 6, e-mail: alsorokin.kimrt@mail.ru

Aleksandr A. Sorokin, Ph.D. (Eng)s, assistant professor, assistant professor of the Department «Mathematical and natural science disciplines», The Caspian Institute of Sea and River Transport named after Gen.-Adm. F. M. Apraksin is a branch of the Volga State University of Water Transport, st. Nikolskaya, 6, Astrakhan city, 414000, Russian Federation, e-mail: alsorokin.kimrt@mail.ru

Пластинин Андрей Евгеньевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Н. Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: plastininae@yandex.ru

Andrey E. Plastinin, assistant professor, Dr. Sci. (Eng), Professor of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, st. Nesterova, 5, N. Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: plastininae@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 18.05.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 08.07.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 10.07.2026.

Научная статья
УДК 519.873
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.062

Количественная оценка организационно-технических факторов, влияющих на качество технического обслуживания береговых объектов Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности мореплавания

Старжинская Н.В.[1] karbovets_n@mail.ru, **Бойко А.И.**[1] ruzhay_ann@mail.ru
[1]Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В статье рассматривается проблема обеспечения качества технического обслуживания радиоэлектронного оборудования береговых объектов Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности мореплавания. Проведено математическое моделирование и количественная оценка влияния ключевых факторов на качество технического обслуживания. В работе использовался однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) для оценки степени влияния пяти факторов (периодичность технического обслуживания, квалификация персонала, обеспеченность ЗИП, условия эксплуатации, способ технической диагностики) на количественные показатели качества технического обслуживания (коэффициент готовности, среднее время ремонта и удельные затраты). Использование модели позволяет осуществлять обоснованный выбор и корректировку стратегии технического обслуживания на основе количественной оценки влияния организационно-технических факторов на ключевые показатели качества технического обслуживания радиооборудования, особенно в условиях его импортозамещения.
Ключевые слова: техническое обслуживание, морской транспорт, математическое моделирование, дисперсионный анализ, стратегия технического обслуживания и ремонта, надежность.
Для цитирования: Старжинская Н.В., Бойко А.И. Количественная оценка организационно-технических факторов, влияющих на качество технического обслуживания береговых объектов Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности мореплавания, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 324—332. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.062

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.062

Quantitative assessment of organizational and technical factors affecting the quality of maintenance of Global Maritime Distress and Safety System in case of disaster and to ensure the safety of navigation

Natalya V. Starzhinskaya[1] karbovets_n@mail.ru, **Anna I. Boyko**[1] ruzhay_ann@mail.ru
[1]Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. The article deals with the problem of ensuring the quality of maintenance of radio-electronic equipment of coastal facilities of the Global Maritime Distress and Safety System in case of disaster and to ensure the safety of navigation. Mathematical modeling and quantitative assessment of the impact of key factors on the quality of maintenance have been carried out. One-way analysis of variance (ANOVA) was used to assess the degree of influence of five factors (frequency of maintenance, qualification of personnel, availability of spare parts, operating conditions, method of technical diagnostics) on quantitative indicators of the quality of maintenance (availability coefficient, average repair time and unit costs). The use of the model makes it possible to make an informed choice and adjustment of the maintenance strategy based on a quantitative assessment of the impact of organizational and technical factors on key indicators of the quality of maintenance of radio equipment, especially in the context of its import substitution.
Key words: maintenance, marine transport, mathematical modeling, analysis of variance, strategy of maintenance and repair, reliability.
For citation: Natalya V. Starzhinskaya, Anna I. Boyko, Quantitative assessment of organizational and technical factors affecting the quality of maintenance of Global Maritime Distress and Safety System in case of disaster and to ensure the safety of navigation, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 324—332. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.062

Введение

Новороссийский морской порт представляет собой крупнейший логистический узел на юге Российской Федерации, обеспечивающий значительный вклад в экономику региона и страны в целом. В условиях интенсивного судоходства обеспечение безопасности мореплавания в акватории порта и прилегающих районах приобретает стратегическое значение. Ключевым элементом системы обеспечения безопасности мореплавания в данном регионе является Глобальная морская система связи при бедствии и для обеспечения безопасности мореплавания (ГМССБ), которая интегрирует наземные, спутниковые и судовые средства связи, обеспечивая

© Старжинская Н.В., Бойко А.И. 2026

надежный обмен информацией в морских районах плавания А1 и А2. В составе ГМССБ Азово-Черноморского бассейнового филиала ФГУП «Росморпорт» функционируют береговые станции морских районов А1 и А2, базовая станция NAVTEX для передачи информации по безопасности мореплавания, Центр управления связью (ЦУС), радиорелейные станции, обеспечивающие передачу данных между объектами ГМССБ (рис.1) [1, 2].

Постановка задачи

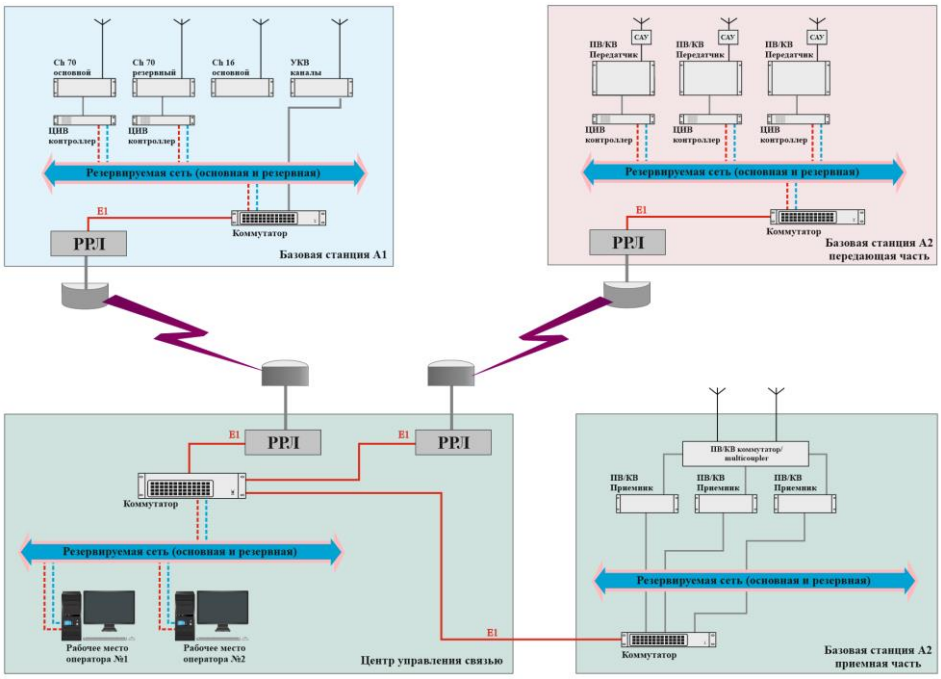


Рис. 1. Структура построения берегового сегмента системы ГМССБ

Качественное и своевременное техническое обслуживание существенно повышает его безотказность РЭО, дополняя его конструктивную надежность. При этом применение традиционных планово-предупредительных стратегий ТО РЭО зачастую приводит к перерасходу ресурсов и снижению коэффициента готовности на 20–30 %. Поэтому, адаптация стратегии ТО к текущему техническому состоянию РЭО в период гарантийной эксплуатации обеспечивает оптимальный баланс между обеспечением требуемого уровня коэффициента готовности и затрат на ТО, определяя актуальность проведения исследований в этой области [4, 5].

Математическое моделирование влияния организационно-технических факторов на качество технического обслуживания оборудования береговых объектов ГМССБ

Как уже было сказано ранее, современные сети связи, применяемые на береговых объектах ГМССБ, содержат значительное количество радиоэлектронного оборудования (радиорелейные станции, УКВ-радиостанции, ПВ/КВ радиостанции, серверы, коммутаторы и т.д.), отказ которого напрямую влияет на безопасность мореплавания и устойчивость обмена информацией. Поэтому особое значение приобретает рациональная организация технического обслуживания (ТО) этого оборудования, обеспечивающая высокий уровень коэффициента готовности при приемлемых затратах ресурсов.

Эффективность функционирования береговых объектов морского транспорта определяется обеспечением их безотказности и ремонтопригодности, а также высоким уровнем эксплуатационной надежности входящего в их состав радиоэлектронного оборудования (РЭО), особенно в условиях эксплуатации, характерных для Черноморского региона (высокая влажность, морской аэрозоль, сильный ветер, перепады температур) [3].

Качество технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) радиоэлектронного оборудования береговых объектов ГМССБ определяется комплексом факторов, которые можно условно разделить на следующие группы: технические, организационные, экономические и социальные [6].

Наиболее существенную роль играют технические факторы, определяющие технологическую базу выполнения регламентных работ и обеспечивающие заданные параметры готовности РЭО. К таким факторам следует отнести:

– состояние технической документации. Полнота, актуальность и доступность эксплуатационной и ремонтной документации к радиооборудованию береговых объектов определяют правильность выполнения регламентных работ. Устаревшая документация приводит к ошибкам диагностики (до 15% случаев) и увеличению трудоемкости ТО на 25-30% [6];

– качество диагностического оборудования, контрольно-измерительных приборов (КИП) и инструментов для проведения восстановительных работ. Наличие специализированного диагностического оборудования, КИП (осциллографы, мультиметры, анализаторы спектра и др.) и профессионального ремонтного оборудования (паяльные станции, кримперы, программаторы и др.) критично для

обеспечения высокого качества ремонта РЭО, поскольку износ оснастки может увеличивать время ремонта на 20% [7, 8];

– качество средств измерений и контроля. Метрологическое оборудование должно иметь действующую поверку и обеспечивать точность измерений, необходимую для аттестации РЭО ГМССБ [6, 7];

– качество исходных материалов, комплектующих. Обеспеченность оригинальными запасными частями (ЗИП) (антенны РРС, трансиверы УКВ, серверы обработки данных, блоки питания и др.) и их соответствие технико-эксплуатационным требованиям к оборудованию ГМССБ. Использование несертифицированных аналогов существенно увеличивает количество отказов в период эксплуатации.

К организационным факторам, влияющим на качество ТО РЭО, относятся [6, 9]:

– обеспеченность материалами и ЗИП. Достаточный уровень комплектности запасными частями критичен для минимизации простоев оборудования. Недостаток комплектующих существенно увеличивает время ремонта;

– организация работ с поставщиками. Своевременность поставок комплектующих и контроль качества поступающего ЗИП;

– регулярное ТО оборудования. Соблюдение графиков планово-предупредительных работ обеспечивает стабильность качества ремонтных работ;

– планомерность и ритмичность работы. Составление планов ТО РЭО с учетом сезонных нагрузок предотвращает накопление дефектов;

– информационное обеспечение. Ведение базы данных отказов РЭО, автоматизация учета ТО;

– стандартизация операций технического обслуживания, обучение персонала и контроль качества работ.

К экономическим факторам, влияющим на качество ТО, относятся [6, 9]:

– система оплаты труда. Введение системы премирования за качество работ по ТО повышает ответственность исполнителей;

– контроль за качеством выполнения работ. Штрафы за некачественный ремонт и повторные отказы;

– оптимизация затрат. Снижение себестоимости ТО за счет совершенствования системы диагностики;

– планирование трудоемкости. Расчет норм времени на проведение ТО РЭО для формирования бюджета.

К социальным факторам, влияющим на качество ТО, относятся [6, 9]:

– повышение квалификации инженерно-технического персонала. Регулярное обучение и сертификация инженерно-технического персонала по обслуживанию РЭО ГМССБ;

– взаимоотношения в коллективе. Снижение текучести кадров для обеспечения преемственности опыта ремонта оборудования;

– бытовые условия. Обеспечение спецодеждой, транспортом и условиями труда для работников;

– контроль качества ТО. Проверка выполнения регламентных работ по ТО и правильности ведения технической документации. Несоблюдение регламента существенно увеличивает отказность РЭО в межремонтные периоды.

Комплексный учет всех групп факторов позволит повысить коэффициент готовности берегового РЭО ГМССБ, минимизируя затраты на ТО и обеспечивая бесперебойную работу береговых объектов морского транспорта. Таким образом, анализ факторов, влияющих на качество технического обслуживания радиооборудования, выявил ключевые группы (технические, организационные, экономические и социальные), определяющие коэффициент готовности $K_г$, среднее время ремонта $T_{рем}$ и удельные затраты на техническое обслуживание $C_{уд}$.

Эти показатели зависят от большого числа эксплуатационных и организационных факторов. В рамках данной работы рассматриваются пять ключевых факторов: периодичность проведения ТО (x_1), квалификация обслуживающего персонала (x_2), обеспеченность запасными частями (ЗИП) (x_3), условия эксплуатации РЭО (x_4), а также применяемый способ технической диагностики (x_5). Каждый из факторов имеет несколько дискретных уровней, соответствующих практическим вариантам организации обслуживания.

Прямое эмпирическое сравнение всех возможных комбинаций факторов затруднено, поскольку требует больших объемов продолжительных эксплуатационных испытаний, а также не позволяет строго оценить относительный вклад каждого фактора в изменение показателей качества. В связи с этим целесообразно применять методы математического моделирования и статистического анализа, позволяющие на ограниченном наборе данных выделить статистически значимые факторы и количественно оценить силу их влияния [10, 11].

Одним из таких методов является дисперсионный анализ (ANOVA – Analysis of Variance), который позволяет эффективно выявлять значимые эффекты на компактных выборках, сравнивая средние значения при разных уровнях факторов [11]. Дисперсионный анализ, который позволяет поочередно оценить вклад каждого фактора в вариацию показателей качества технического обслуживания называется однофакторным дисперсионным анализом (one-way ANOVA).

В практических исследованиях дисперсионный анализ основывается на ряде предпосылок. Одной из них является использование *F*-критерия Снедекора-Фишера для проверки значимости влияния факторов. Поскольку *F*-критерий базируется на предположении о нормальном распределении генеральных совокупностей, из которых взяты выборки, это обстоятельство существенно для применения метода. В проведенном исследовании предполагается, что выборки нормально распределены – это необходимое условие для получения надежных результатов. Второй предпосылкой является равенство разброса данных между уровнями фактора. Стабильность дисперсии выборок контролируется критериями Левина или Бартлетта, при необходимости данные стабилизируются перед анализом [11].

Исходные данные для проведения дисперсионного анализа получены из эксплуатационной документации (журналы ТО и ремонтов), ведение которой предусмотрено

нормативными требованиями по техническому обслуживанию. Однако, поскольку в реальных условиях получение достаточного объема эксплуатационных данных по всем рассматриваемым комбинациям уровней факторов требует значительного времени и организационных ресурсов, в работе дополнительно применено статистическое моделирование. Моделирование исходных данных основано на задаваемых диапазонах эксплуатационных значений показателей качества для различного уровня организации ТО и проведено с помощью математического редактора MathCAD с использованием нормального распределения, где параметры среднего значения показателей качества ТО и среднеквадратического отклонения σ определены по фактическим данным из журналов ТО и Р для каждого уровня факторов x_1– x_5 (см. рис. 2). Для каждого фактора x_1– x_5 необходимо рассмотреть влияние данного фактора на один из показателей качества (коэффициент готовности, среднее время ремонта или удельные затраты), при этом остальные факторы считаются фиксированными либо варьируются в пределах, не искажающих оценку.

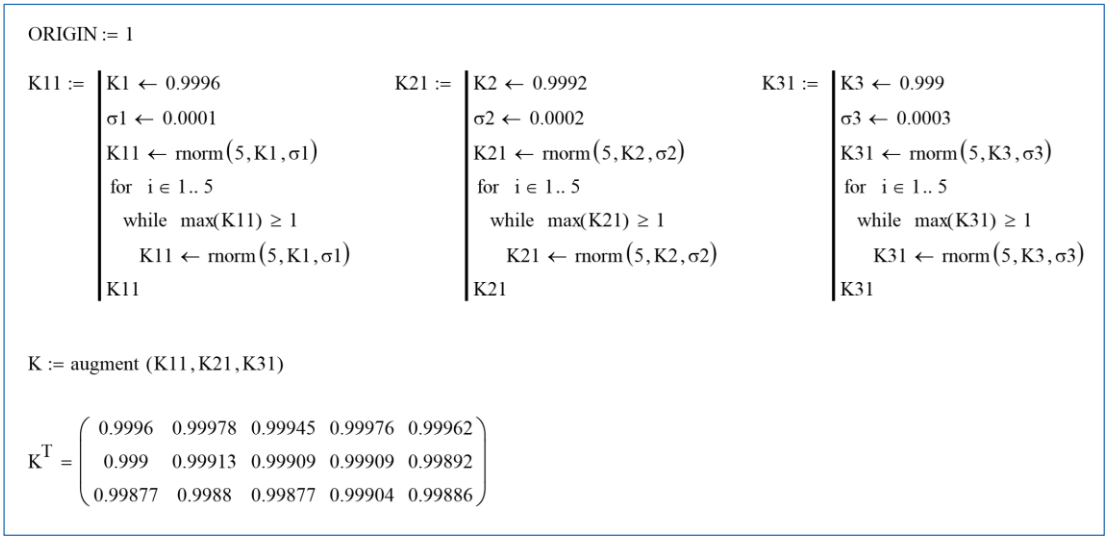


Рис. 2. Моделирование исходных данных уровня коэффициента готовности в зависимости от периодичности проведения ТО

Исходные данные представляются в виде матриц вида $M_{k\times n}$, где k – число уровней фактора (k=3), а n – число наблюдений (n=5) для каждого уровня. Элемент матрицы M_{ij} задает значение выбранного показателя качества при i-м уровне фактора и j-м наблюдении. Далее с помощью составленных матриц исходных данных выполняется расчет внутригрупповой и межгрупповой сумм квадратов отклонений, степеней свободы, средних квадратов и отношения Фишера $F_{эксп}$, которое сравнивается с табличным значением $F_{кр}$ при заданном уровне значимости α=0,05. Если $F_{эксп} > F_{кр}$, влияние фактора на рассматриваемый показатель признается статистически значимым; в противном случае принимается гипотеза об отсутствии заметного влияния. Исходные данные для проведения анализа по показателю качества «коэффициент готовности» представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные по показателю качества «коэффициент готовности»

Факторы	1	2	3	4	5
Градации уровня фактора «периодичность проведения ТО»					
ежемесячно	0,9996	0,99978	0,99945	0,99976	0,99962
ежеквартально	0,999	0,99913	0,99909	0,99909	0,99892
ежегодно	0,99877	0,9988	0,99877	0,99904	0,99886
Градации уровня фактора «квалификация обслуживающего персонала»					
эксперт	0,99971	0,99959	0,99978	0,99957	0,99951
высокая	0,99803	0,99879	0,99848	0,99869	0,99845
средняя	0,99656	0,99728	0,99703	0,99721	0,99743
Градации уровня фактора «обеспеченность ЗИП»					
100 %	0,99942	0,99918	0,9989	0,99908	0,99922
85%	0,99849	0,99864	0,99869	0,99817	0,99869
70%	0,99758	0,99804	0,99783	0,99813	0,99801

Градации уровня фактора «условия эксплуатации РЭО»					
морской климат	0,99791	0,99788	0,99817	0,99798	0,99802
ветровые нагрузки	0,99894	0,99831	0,99901	0,99826	0,99845
удаленность АРТП	0,99682	0,9972	0,99684	0,99755	0,99739
Градации уровня фактора «способ технической диагностики»					
удаленная	0,99887	0,99902	0,99923	0,99897	0,99897
локальная	0,99754	0,99852	0,99788	0,99788	0,99771
визуальный осмотр	0,996	0,99611	0,99583	0,99586	0,99642

На рисунке 3 приведен программный блок оценки значимости периодичности проведения технического обслуживания по критерию «коэффициент готовности», разработанный в среде MathCAD.

$$\text{ORIGIN} := 1$$

$$\text{D11} := \left| \begin{array}{l} \text{M} \leftarrow \begin{pmatrix} 0.9996 & 0.99978 & 0.99945 & 0.99976 & 0.99962 \\ 0.999 & 0.99913 & 0.99909 & 0.99909 & 0.99892 \\ 0.99877 & 0.9988 & 0.99877 & 0.99904 & 0.99886 \end{pmatrix} \\ \text{k} \leftarrow \text{rows}(\text{M}) \\ \text{g} \leftarrow \text{cols}(\text{M}) \\ \text{n} \leftarrow (5 \;\; 5 \;\; 5)^{\text{T}} \\ \text{N} \leftarrow \sum_{i=1}^{k} \text{n}_i \\ \text{for} \;\; \text{i} \in 1..\text{k} \\ \quad \text{X}_i \leftarrow \frac{1}{\text{n}_i} \cdot \sum_{j=1}^{\text{n}_i} \text{M}_{i,j} \\ \text{XN} \leftarrow \frac{1}{\text{N}} \cdot \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{\text{n}_i} \text{M}_{i,j} \\ \text{Sw} \leftarrow \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{\text{n}_i} \left(\text{X}_i - \text{M}_{i,j}\right)^2 \\ \text{MSw} \leftarrow \frac{\text{Sw}}{\text{N} - \text{k}} \\ \text{Sb} \leftarrow \sum_{i=1}^{k} \left[\text{n}_i \cdot \left(\text{X}_i - \text{XN}\right)^2 \right] \\ \text{MSb} \leftarrow \frac{\text{Sb}}{\text{N} - 1} \\ \alpha \leftarrow 0.05 \\ \text{FN} \leftarrow \frac{\text{MSb}}{\text{MSw}} \\ \text{Sобщ} \leftarrow \text{Sb} + \text{Sw} \\ \eta \leftarrow \frac{\text{Sb}}{\text{Sобщ}} \\ \text{D} \leftarrow \begin{pmatrix} \text{qF}(1 - \alpha, \text{N} - 1, \text{N} - \text{k}) \\ \text{FN} \\ \eta \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

$$\text{D11}^{\text{T}} = (2.637 \;\; 9.602 \;\; 0.918)$$

Рис. 3. Программный блок анализа влияния периодичности проведения технического обслуживания на коэффициент готовности

Результаты проведенного анализа показали, что значение рассчитанного критерия *FN*=9,602, а значение критического значения *F*-критерия $F_{крит}$=2,637. При этом, $FN > F_{\text{крит}}$. Полученный результат позволяет утверждать, что анализируемый фактор, «периодичность проведения ТО», значим и оказывает влияние на качество ТО. Для оценки степени влияния фактора также был рассчитан выборочный коэффициент детерминации η^2. В результате расчетов было получено значение коэффициента детерминации $\eta^2 = 0{,}918$, т.е. 91,8% общей вариации коэффициента готовности обусловлено влиянием фактора «периодичность проведения ТО».

Аналогичные расчеты были проведены для остальных факторов: «квалификация обслуживающего персонала», «обеспеченность ЗИП», «условия эксплуатации РЭО», а также «способ технической диагностики».

Результаты однофакторного анализа по критерию «коэффициент готовности» приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты однофакторного дисперсионного анализа по критерию «коэффициент готовности»

№	Исследуемый фактор	Расчетные значения дисперсионных отношений, *FN*	Теоретические значения дисперсионных отношений, $F_{крит}$	Значение выборочного коэффициента детерминации, η^2	Вывод о значимости фактора
1	Периодичность проведения ТО	9,602	2,637	0,918	фактор значим
2	Квалификация обслуживающего персонала	16,347	2,637	0,95	фактор значим
3	Обеспеченность ЗИП	6,234	2,637	0,88	фактор значим
4	Условия эксплуатации РЭО	4,525	2,637	0,841	фактор значим
5	Способ технической диагностики	22,706	2,637	0,964	фактор значим

Согласно результатам расчетов, приведенным в табл.2, все пять исследуемых факторов являются статистически значимыми. Этот вывод подтверждается сравнением расчетных значений F-критерия с критическим значением. Для каждого фактора расчетное значение дисперсионного отношения значительно превышает теоретическое (критическое) значение. Высокие значения коэффициента детерминации показывают сильное влияние каждого фактора на исследуемый показатель. При этом наибольшее влияние оказывает фактор «способ технической диагностики», поскольку значение коэффициента детерминации для этого фактора составляет $\eta^2 = 0{,}964$ и является наивысшим показателем среди всех пяти факторов, представленных в таблице. Это означает, что 96,4% изменчивости (дисперсии) исследуемого показателя напрямую объясняется различиями в способах технической диагностики.

Аналогичный однофакторный дисперсионный анализ выполнен по критериям «среднее время ремонта» $T_{\text{рем}}$ и «удельные затраты на ТО» $C_{\text{уд}}$. Результаты расчетов представлены в табл. 3, 4.

Таблица 3

Результаты однофакторного дисперсионного анализа по критерию «среднее время ремонта»

№	Исследуемый фактор	Расчетные значения дисперсионных отношений, *FN*	Теоретические значения дисперсионных отношений, $F_{крит}$	Значение выборочного коэффициента детерминации, η^2	Вывод о значимости фактора
1	Периодичность проведения ТО	3,882	2,637	0, 819	фактор значим
2	Квалификация обслуживающего персонала	16,379	2,637	0,95	фактор значим
3	Обеспеченность ЗИП	58,996	2,637	0,986	фактор значим
4	Условия эксплуатации РЭО	93,933	2,637	0,991	фактор значим
5	Способ технической диагностики	91,875	2,637	0,991	фактор значим

Таблица 4

Результаты однофакторного дисперсионного анализа по критерию «удельные затраты на техническое обслуживание»

№	Исследуемый фактор	Расчетные значения дисперсионных отношений, FN	Теоретические значения дисперсионных отношений, $F_{крит}$	Значение выборочного коэффициента детерминации, η^2	Вывод о значимости фактора
1	Периодичность проведения ТО	2,976	2,637	0, 776	фактор значим
2	Квалификация обслуживающего персонала	2,351	2,637	0,733	фактор значим
3	Обеспеченность ЗИП	6,992	2,637	0,891	фактор значим
4	Условия эксплуатации РЭО	3,533	2,637	0,805	фактор значим
5	Способ технической диагностики	10,065	2,637	0,922	фактор значим

Согласно результатам расчетов, приведенным в табл. 3, все пять исследуемых факторов являются статистически значимыми. При этом наибольшее влияние оказывают факторы «способ технической диагностики», «условия эксплуатации РЭО», поскольку значение коэффициента детерминации для этих факторов составляет $\eta^2 = 0{,}991$. Это означает, что 99,1% изменчивости (дисперсии) исследуемого показателя напрямую объясняется различиями в способах технической диагностики, а также условиями эксплуатации. Не менее сильное влияние оказывают факторы «обеспеченность ЗИП» ($\eta^2 = 0{,}986$) и «квалификация обслуживающего персонала» ($\eta^2 = 0{,}95$).

По критерию «среднее время ремонта», согласно табл. 4 наибольшее влияние оказывает фактор «способ технической диагностики», поскольку значение коэффициента детерминации для этого факторов составляет $\eta^2 = 0{,}922$. Не менее сильное влияние оказывает фактор «обеспеченность ЗИП» ($\eta^2 = 0{,}891$).

Проведенное математическое моделирование и количественная оценка подтвердило статистическую значимость исследуемых факторов (x_1– x_5) на три ключевых показателя качества ТО РЭО ГМССБ при уровне значимости α=0.05. Все расчетные значения FN существенно превышают критическое значение $F_{крит}$=2.637, а коэффициенты детерминации η^2 варьируются от 0.733 до 0.991, демонстрируя исключительно сильное объясняющее влияние факторов на изменчивость показателей.

Заключение

Результаты проведенного однофакторного дисперсионного анализа позволяют количественно оценить влияние организационно-технических факторов на ключевые показатели качества технического обслуживания радиооборудования: «коэффициент готовности», «среднее время ремонта» и «удельные эксплуатационные затраты». Во всех случаях расчетные значения критерия Фишера превысили критическое значение при уровне значимости α = 0,05, что свидетельствует о статистической значимости всех исследуемых факторов.

Для практического применения полученных результатов важно не только установить сам факт влияния, но и определить приоритетность факторов с точки зрения системы технического обслуживания и выбора оптимальной стратегии.

Анализ коэффициентов детерминации показал следующее:

– на коэффициент готовности наибольшее влияние оказывает способ технической диагностики ($\eta^2 \approx 0{,}964$), квалификация персонала ($\eta^2 \approx 0{,}95$) и периодичность ТО ($\eta^2 \approx 0{,}918$);

– на среднее время ремонта решающее влияние оказывают условия эксплуатации ($\eta^2 \approx 0{,}991$), способ диагностики ($\eta^2 \approx 0{,}991$) и обеспеченность ЗИП ($\eta^2 \approx 0{,}986$);

– на удельные затраты на ТО наибольшее влияние оказывают способ диагностики ($\eta^2 \approx 0{,}922$) и обеспеченность запасными частями ($\eta^2 \approx 0{,}891$).

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

– техническая диагностика является системообразующим фактором, оказывающим сильное влияние сразу на все три показателя качества;

– обеспеченность ЗИП и квалификация персонала формируют ресурсную и организационную основу эффективности ТО;

– периодичность проведения ТО влияет в первую очередь на надежностные показатели, но в меньшей степени – на экономические;

– условия эксплуатации являются внешним ограничивающим фактором, который невозможно устранить, но необходимо учитывать при планировании ТО.

Полученные результаты однофакторного дисперсионного анализа предоставляют количественные критерии для выбора либо одной оптимальной стратегии технического обслуживания радиооборудования берегового сегмента ГМССБ, либо применения нескольких стратегий одновременно. При этом выбор оптимальной стратегии технического обслуживания должен основываться не только на регламенте проведения ТО, но и учитывать комплексное влияние всех факторов на готовность оборудования.

Литература

1. Береговые радиостанции морских районов А1 и А2 / Режим доступа: http://www.radiocomplex.ru/files/images/article/BRIS_US_1.pdf. Дата обращения: 15.01.2026.
2. Старжинская Н.В. Анализ качества передачи информации в системе радиорелейной линии связи Центра управления связью порта Новороссийск / Н.В. Старжинская, А.И. Бойко, И.С. Кондратьев, Т.А. Макаревич // Эксплуатация морского транспорта. – 2025. – № 3(116). – С. 132-139.
3. Pankina, S. I. Geospatial Approaches to Monitoring Hydrometeorological Variables in the Black Sea Region / S. I. Pankina, M. N. Lyutikova, E. S. Smagulova // Innovations in Sustainable Agricultural Systems, Agriculture 4.0 and Precision Agriculture. Volume 1: Conference Proceedings, Stavropol, Russia Samarkand, Uzbekistan, 05–06 марта 2025 года. – Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2026. – P. 3-13.
4. Старжинская, Н.В. Планирование системы технического обслуживания радиоэлектронного оборудования Центра дистанционного управления морскими автономными надводными судами / Н.В. Старжинская, А.И. Чернова // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – № 4-1(66). – С. 359-366.
5. ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. Москва, Стандартинформ, 2017.
6. Михайлов, В.В. Анализ факторов, влияющих на надежность техники в гарантийный период эксплуатации / В.В. Михайлов, Д.А. Мисюра // Вестник науки и образования. – 2024. – № 5-2(148). – С. 19-26.
7. Проценко, М.Б. Основные направления совершенствования натурных испытаний береговых объектов и центров СУДС и ГМССБ / М.Б. Проценко, В.В. Громоздин, В.И. Коваленко // Труды Научно-исследовательского института радио. – 2019. – № 1. – С. 63-68.
8. Редькин, Ю. В. Решение задачи сбора и обработки данных в целях повышения качества контроля / Ю.В. Редькин, И.И. Бузенков, Е.М. Чернышева // Современные информационные технологии в управлении качеством : сборник статей VI Международной научно-прикладной конференции, Пенза, 04–05 июня 2018 года. – Пенза: Автономная некоммерческая научно-образовательная организация «Приволжский Дом знаний», 2018. – С. 31-36.
9. Гребешков, А.Ю. Техническая эксплуатация и управление телекоммуникационными сетями и системами: учебное пособие / А.Ю. Гребешков. – Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2017. – 199 с. – Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART. – URL: https://www.iprbookshop.ru/75415.html (дата обращения: 02.02.2026).
10. Кане, М.М. Анализ исходных данных при статистической обработке результатов научных исследований: учебное пособие / М.М. Кане. – Минск: Вышэйшая школа, 2024. – 120 с. – ISBN 978-985-06-3600-3. – Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/155252.html (дата обращения: 02.02.2026).
11. Горленко, О.А. Дисперсионный анализ экспериментальных данных: учебник для вузов / О.А. Горленко, Н.М. Борбаць, Т.П. Можаева. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2026. – 132 с. – (Высшее образование). – ISBN978-5-534-14677-6. – Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – URL:https://urait.ru/bcode/587557 (дата обращения: 02.02.2026).

References

1. Beregovye radiostancii morskih rajonov A1 i A2 [Coastal radio stations of sea areas A1 and A2] [Электронный ресурс] [Elektronnyj resurs]/ Rezhim dostupa: http://www.radiocomplex.ru/files/images/article/BRIS_US_1.pdf. Data obrashcheniya: 15.01.2026.
2. Starzhinskaya N.V. Analiz kachestva peredachi informacii v sisteme radiorelejnoj linii svyazi Centra upravleniya svyaz'yu porta Novorossijsk [Analysis of the information transmission quality in the radio relay communication system of the Novorossiysk port communication control centre] / N.V. Starzhinskaya, A.I. Bojko, I.S. Kondrat'ev, T.A. Makarevich // Ekspluataciya morskogo transporta. 2025. № 3(116). S. 132-139.
3. Pankina, S.I. Geospatial Approaches to Monitoring Hydrometeorological Variables in the Black Sea Region / S.I. Pankina, M. N. Lyutikova, E. S. Smagulova // Innovations in Sustainable Agricultural Systems, Agriculture 4.0 and Precision Agriculture. Volume 1: Conference Proceedings, Stavropol, Russia Samarkand, Uzbekistan, 05-06 marta 2025 goda. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2026. P. 3-13.
4. Starzhinskaya, N.V. Planirovanie sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya radioelektronnogo oborudovaniya Centra distancionnogo upravleniya morskimi avtonomnymi nadvodnymi sudami [Planning of a maintenance system for the radio-electronic equipment of the Remote Control Center for Maritime Autonomous Surface Ships] / N.V. Starzhinskaya, A.I. CHernova // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2024. № 4-1(66). S. 359-366.
5. GOST 18322-2016. Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta tekhniki. Terminy i opredeleniya [Maintenance and repair system of engineering. Terms and definitions]. Moskva, Standartinform, 2017.
6. Mihajlov, V.V. Analiz faktorov, vliyayushchih na nadezhnost' tekhniki v garantijnyj period ekspluatacii [Analysis of factors affecting equipment reliability during the warranty period of operation] / V.V. Mihajlov, D.A. Misyura // Vestnik nauki i obrazovaniya. 2024. № 5-2(148). S. 19-26.
7. Procenko, M.B. Osnovnye napravleniya sovershenstvovaniya naturnyh ispytanij beregovyh ob"ektov i centrov SUDS i GMSSB [Main directions for improving full-scale tests of coastal facilities and VTS and GMDSS centers]/ M.B. Procenko, V.V. Gromozdin, V.I. Kovalenko // Trudy Nauchno-issledovatel'skogo instituta radio. 2019. № 1. S. 63-68.
8. Red'kin, YU. V. Reshenie zadachi sbora i obrabotki dannyh v celyah povysheniya kachestva kontrolya [The solution of the problem of data acquisition and processing for improving the quality of control] / YU.V. Red'kin, I.I. Buzenkov, E.M. Chernysheva // Sovremennye informacionnye tekhnologii v upravlenii kachestvom: sbornik statej VI

Mezhdunarodnoj nauchno-prikladnoj konferencii, Penza, 04-05 iyunya 2018 goda. Penza: Avtonomnaya nekommercheskaya nauchno-obrazovatel'naya organizaciya «Privolzhskij Dom znanij», 2018. S. 31-36.
9. Grebeshkov, A.YU. Tekhnicheskaya ekspluataciya i upravlenie telekommunikacionnymi setyami i sistemami [Technical operation and management of telecommunication networks and systems]: uchebnoe posobie / A.YU. Grebeshkov. Samara: Povolzhskij gosudarstvennyj universitet telekommunikacij i informatiki, 2017. 199 c. Tekst: elektronnyj // Cifrovoj obrazovatel'nyj resurs IPR SMART. URL: https://www.iprbookshop.ru/75415.html (data obrashcheniya: 02.02.2026).
10. Kane, M.M. Analiz iskhodnyh dannyh pri statisticheskoj obrabotke rezul'tatov nauchnyh issledovanij [Analysis of the initial data in the statistical processing of scientific research results]: uchebnoe posobie / M.M. Kane. Minsk: Vyshejshaya shkola, 2024. 120 c. ISBN 978-985-06-3600-3. Tekst: elektronnyj // Cifrovoj obrazovatel'nyj resurs IPR SMART: [sajt]. URL: https://www.iprbookshop.ru/155252.html (data obrashcheniya: 02.02.2026).
11. Gorlenko, O.A. Dispersionnyj analiz eksperimental'nyh dannyh [Variance analysis of experimental data]: uchebnik dlya vuzov / O.A. Gorlenko, N.M. Borbac', T.P. Mozhaeva. 2-e izd., ispr. i dop. Moskva: Izdatel'stvo YUrajt, 2026. 132 s. (Vysshee obrazovanie). ISBN978-5-534-14677-6. Tekst: elektronnyj // Obrazovatel'naya platforma YUrajt [sajt]. URL:https://urait.ru/bcode/587557 (data obrashcheniya: 02.02.2026).

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

Старжинская Наталья Викторовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: karbovets_n@mail.ru

Бойко Анна Ивановна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: ruzhay_ann@mail.ru

Natalya V. Starzhinskaya, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Radio Electronics and Information Technology, Admiral Ushakov Maritime University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, e-mail: karbovets_n@mail.ru

Anna I. Boyko, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Radio Electronics and Information Technology, Admiral Ushakov Maritime University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, e-mail: ruzhay_ann@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 19.02.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.06.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 23.06.2026.

Научная статья
УДК 347.796; 627.222.24; 504.064
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.063

Моделирование аварийных разливов нефтепродуктов и загрязнения прибрежной защитной полосы при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на морском транспорте

Королева Л.А.[1,2] lyudamil@mail.ru, **Малыгин И.Г.**[1,2] malygin_com@mail.ru
[1]Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, [2]Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Аннотация. Проведен анализ аварий на морском транспорте, связанных с аварийными разливами нефти и нефтепродуктов (АРН) и загрязнением прибрежной защитной полосы (ПЗП). Установлено, что они представляют серьезную угрозу морским и прибрежным экосистемам. Совершенствование процессов мониторинга состояния почв ПЗП в местах возможного воздействия нефтяного загрязнения при АРН на морском транспорте является актуальной задачей. Проведен анализ и установлена роль лабораторных методов количественного и качественного анализа проб почвы в оценке уровня загрязнения ПЗП. Обоснована целесообразность применения методов инфракрасной спектроскопии и молекулярной люминесценции для оперативного контроля и мониторинга чрезвычайных ситуаций (ЧС). Разработана и реализована в условиях Финского залива система оценки уровня загрязнения ПЗП при АРН на морском транспорте. Установлена и обоснована последовательность обработки экспериментальных данных, полученных при определении концентрации нефти и нефтепродуктов в почвах ПЗП методом инфракрасной спектроскопии. Определены преимущества предлагаемой системы. При ее использовании достигается сокращение времени обследования территорий, что позволяет ускорить принятие решений, направленных на предупреждение, локализацию и ликвидацию ЧС. Возможность учета фонового содержания органических веществ в почвах ПЗП обеспечивает повышение обоснованности оценки уровня загрязнения. Представлены параметры оценки уровня нефтяного загрязнения и установлен критерий возникновения ЧС, связанный с загрязнением ПЗП при АРН на морском транспорте. Выявление новых разливов, сравнение территорий по степени нефтяного загрязнения являются основными направлениями использования разработанной системы.

Ключевые слова: морской транспорт, моделирование, прибрежная защитная полоса, модель, мониторинг, чрезвычайная ситуация, аварийный разлив нефти и нефтепродуктов, инфракрасная спектроскопия, логистическая функция, загрязнение.
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: Королева Л.А., Малыгин И.Г. Моделирование аварийных разливов нефтепродуктов и загрязнения прибрежной защитной полосы при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на морском транспорте, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 333—343. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.063

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.063

Modeling of emergency oil product spills and pollution of the coastal protective strip in response to emergency situations in maritime transport

Lyudmila A. Koroleva[1,2] lyudamil@mail.ru, **Igor G. Malygin**[1,2] malygin_com@mail.ru
[1]Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, [2]Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia,

Abstract. An analysis of accidents in marine transport related to emergency oil and petroleum product spills and pollution of the coastal protective strip has been carried out. They have been found to pose a serious threat to marine and coastal ecosystems. Improving the processes of monitoring the soil condition of the coastal protective strip in places of possible exposure to oil pollution in emergency oil and petroleum product spills in marine transport is an urgent task The analysis was carried out and the role of laboratory methods of quantitative and qualitative analysis of soil samples in assessing the pollution level of the coastal protective strip was established. The expediency of using infrared spectroscopy and molecular luminescence methods for operational control and monitoring of emergency situations is substantiated. A system has been developed and implemented in the conditions of the Gulf of Finland to assess the level of pollution of the coastal protective strip in case of emergency oil and petroleum product spills on marine transport. The sequence of processing experimental data obtained in determining the concentration of oil and petroleum products in the soils of the coastal protective strip by infrared spectroscopy has been established and substantiated. The advantages of the proposed system are determined. When using it, a reduction in time for the survey of territories is achieved, which makes it possible to speed up decision-making aimed at preventing, localizing and eliminating emergencies. The possibility of taking into account the background content of organic substances in the

© Королева Л.А., Малыгин И.Г. 2026

soils of the coastal protective strip increases the validity of the assessment of pollution levels. The parameters for assessing the level of oil pollution are presented and a criterion for the occurrence of an emergency situations related to pollution of the coastal protective strip in the event of accidental oil and petroleum product spills on marine transport is established. The identification of new spills and the comparison of territories according to the degree of oil pollution are the main areas of use of the developed system.
Keywords: marine transport, modeling, coastal protective strip, model, monitoring, emergency situation, emergency oil and oil products spill, infrared spectroscopy, logistic function, pollution.
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: Lyudmila A. Koroleva, Igor G. Malygin Modeling of emergency oil product spills and pollution of the coastal protective strip in response to emergency situations in maritime transport Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 333—343. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.063

Введение

Несмотря на происходящий переход к устойчивым источникам энергии и альтернативным возобновляемым видам топлива, мировой спрос на нефть и нефтепродукты остается высоким [1, 2]. По данным Международной федерации владельцев танкеров по борьбе с загрязнением окружающей среды (ОС) (International Tanker Owners Pollution Federation, ITOPF) при общем росте объемов торговли нефтью за последние пятьдесят лет сохраняется тенденция к снижению количества ее разливов, что связано с нормативными и эксплуатационными мерами, принимаемыми Международной морской организацией (ИМО, International Maritime Organization, IMO), однако объемы вылившейся нефти остаются высокими [1]. В 2025 году объем нефти, потерянной в результате разливов из танкеров, составил около 4000 тонн, что значительно меньше, чем в 2024 году (около 10000 тонн) [3]. Анализ статистических данных показывает, что в период с 1970 по 2024 гг. примерно 50% разливов произошли в период нахождения судов в открытой воде, при этом 31% из них связаны с посадками на мель, 30% - со столкновениями (сближениями) и подчеркивает сохраняющуюся актуальность навигационных опасностей как основных причинных факторов [1, 3]. Аварийные разливы нефти и нефтепродуктов (АРН) представляют серьезную угрозу морским и прибрежным экосистемам, вызывая как немедленные, так и долгосрочные последствия [1, 4, 5]. Транспортировка нефти и нефтепродуктов морским путем, эксплуатация береговой инфраструктуры создают устойчивые риски возникновения аварий, которые быстро перерастают в чрезвычайные ситуации (ЧС) [6, 7].

Например, катастрофическая авария на буровой платформе British Petroleum (BP), произошедшая в апреле 2010 года, сопровождалась поступлением в Мексиканский залив приблизительно 5 млн баррелей нефти [8]. По официальному заявлению главы BP через год после аварии, «более 99 % залива открыто для рыбного промысла, … морепродукты в нем безопасны для употребления в пищу» [9]. Однако в реальных условиях примерно ¼ часть находящейся под юрисдикцией США площади Мексиканского залива была закрыта для ловли рыбы. Фиксировались нефтяные пятна, в том числе подводные, одно из которых достигало длины примерно 35 км и ширины 1км [9].

Занижение масштабов аварии ее виновниками может быть причиной несоответствия официальных и независимых данных. Однако эти результаты могли отражать действительность, так как выводы были основаны на нормах содержания нефтепродуктов в воде без учета наличия большого количества тяжелых нефтепродуктов в донных отложениях и на береговой линии, оказывающих сильное воздействие на состояние водной среды и ее обитателей [9].

Разлив нефтепродуктов в районе порта Невельск Сахалинской области произошел в ноябре 2015 года. Повреждение корпуса танкера «Надежда» стало следствием его выброса на мель. В результате аварии в акваторию порта и прилегающие районы попало около 246 тонн мазута и 65 тонн дизельного топлива [10]. Разлив привёл к загрязнению акватории площадью более 20000 м^2 и береговой полосы длиной около семи километров, а также массовому уничтожению птиц [11]. Исследования [10] показали, что содержание нефтепродуктов в воде в первые дни после аварии превышало предельно-допустимые концентрации (ПДК), установленные для водных объектов рыбохозяйственного назначения, в 378 раз. Однако в середине декабря, благодаря диспергированию и ветровому воздействию, концентрация в воде нефтепродуктов снизилась до 2-4 ПДК. Протяженность загрязненного нефтепродуктами берегового участка составила приблизительно 13 км [10].

В декабре 2024 года произошло крушение двух нефтяных танкеров «Волгонефть» в Керченском проливе. Суда транспортировали примерно 9200 тонн мазута, в Чёрное море вытекло около 40% топлива. Когда разлив нефтепродуктов достиг побережья Краснодарского края, пораженными оказались 54 км береговой линии [12]. Наибольший ущерб разлив нанес популяциям птиц, морских млекопитающих и донным организмам. На восстановление экосистемы побережья Анапы и Крыма потребуется, по различным оценкам, от нескольких до ста лет.

Прибрежная защитная полоса (ПЗП) представляет собой зону сопряжения суши и моря и является частью водоохранной зоны [13], естественной границей двух сред. Она является продуктивной в биологическом отношении [7] и подвержена интенсивному антропогенному воздействию. ПЗП служит преградой на пути распространения нефтяного разлива и способна при определенных условиях аккумулировать нефть и продукты ее преобразования. Это определяет приоритетность защиты ПЗП и необходимость

мониторинга ее состояния, данные которого служат основой для планирования и проведения мероприятий по предотвращению, локализации и ликвидации АРН, для прогнозирования связанных с ними ЧС и наблюдения за динамикой их развития.

Совершенствование процессов мониторинга состояния почв ПЗП в местах возможного воздействия нефтяного загрязнения является актуальной задачей [14-17].

Цель работы заключается в моделировании аварийных разливов нефтепродуктов и загрязнения прибрежной защитной полосы при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на морском транспорте.

Материалы и методы

В настоящее время наиболее развитой областью нормирования состояния ОС является система санитарно-гигиенических нормативов, среди которых наиболее распространенными являются ПДК, устанавливаемые раздельно для атмосферного воздуха, почвы и воды. Применение системы ПДК для почв не позволяет учесть особенности территорий, определяемые спецификой почв, природными и климатическими характеристиками региона, закономерностями рассеяния в ОС загрязняющих веществ и продуктов их трансформации, различным уровнем фонового содержания природных органических соединений и т.д. [14, 18].

Концентрация нефти и нефтепродуктов в почве на биологически безопасном уровне не установлена «из-за сложного и непостоянного химического состава нефтей» [19]. Значительно затрудняет мониторинг и прогнозирование ЧС, связанных с поступлением в почву нефти и нефтепродуктов, отсутствие подтвержденного (нормированного) значения ПДК их валового содержания [14, 18].

Ключевую роль в оценке уровня загрязнения играют лабораторные методы количественного и качественного анализа проб почвы [20]. Наиболее распространенные методы, используемые для количественных оценок уровня загрязнения почвы нефтью и нефтепродуктами, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Методы количественной оценки уровня загрязнения почв [20-26]

Сущность метода, область применения	Достоинства	Ограничения
Инфракрасной спектроскопии (ИК-спектроскопии)		
Базируется на свойстве нефтепродуктов поглощать излучение в инфракрасной области спектра. Основной метод рутинного мониторинга и контроля соответствия нормативам. Может быть использован в полевых условиях.	Не требует сложного оборудования, значительных затрат времени, имеет относительно невысокую стоимость анализа и хорошую воспроизводимость результатов.	Не позволяет идентифицировать состав, чувствителен к помехам со стороны липидов и гуминовых веществ, неэффективен для легких фракций нефтепродуктов.
Молекулярной люминесценции (флуориметрический)		
Основан на способности нефтепродуктов к излучению в ультрафиолетовой части спектра. Применяется для предварительной оценки загрязнения на протяженных территориях и оперативного контроля в полевых условиях.	Высокая чувствительность и широкий диапазон определяемых концентраций.	Зависимость сигнала от состава нефтепродуктов, что требует калибровки по конкретному типу загрязнителя.
Гравиметрический		
Основан на точном определении массы вещества после его экстракции из почвы органическим растворителем и высушивания. Может использоваться для грубой оценки уровня загрязнения при крупных разливах, малопригоден для мониторинга.	Не требует сложного и дорогостоящего оборудования, прост в исполнении. Отсутствует необходимость в предварительной градуировке, возможно использование при высоких уровнях загрязнения.	Длительность проведения анализа, трудоемкость, невысокая чувствительность, малая избирательность, невозможность идентификации состава загрязнения, высокий предел обнаружения, трудность определения малых количеств загрязнителя.
Газовая и газожидкостная хроматография		
Физико-химическое разделение загрязнителей на компоненты за счет их распределения между двумя несмешивающимися и движущимися относительно друг друга фазами. Методы применяются для установления полной картины загрязнения и его потенциальной опасности.	Позволяют определить количество и идентифицировать качественный состав загрязнителей. Высокая точность разделения, универсальность. Возможность обнаружения низких концентраций загрязнителей и автоматизации процесса определения.	Значительная стоимость оборудования и его эксплуатации, необходимость в высокой квалификации персонала, чувствительность к качеству проб, длительность анализа.
Хромато-масс-спектрометрия ГХ-МС		
Основан на комбинации газовой хроматографии и масс-спектрометрии. С помощью хроматографа проба разделяется на компоненты, а масс-спектрометр позволяет их	Возможность одновременной идентификации соединений в многокомпонентных смесях, высокая чувствительность, возможность оценки	Значительная стоимость оборудования и его эксплуатации, необходимость высокой квалификации персонала, сложность

Сущность метода, область применения	Достоинства	Ограничения
идентифицировать. ГХ-МС используется при рутинных анализах с целью определения компонентного состава.	фракционного состава и автоматизации процесса определения.	подготовки проб, длительность анализа. Наложение сигналов компонентов может влиять на результаты определения.
Спектроскопия ядерного магнитного резонанса (ЯМР-спектроскопия)		
Спектроскопический метод исследования химических объектов, использующий явление ядерного магнитного резонанса. Позволяет получить детальную информацию о структуре, составе и свойствах нефтяных компонентов.	Универсальность и неразрушающий характер метода, возможность анализа сложных многокомпонентных систем, минимальная подготовка образца, возможность получать информацию о физико-химических свойствах нефтепродуктов	Значительная стоимость оборудования и его эксплуатации, необходимость высокой квалификации персонала, низкая чувствительность, возможность наложения пиков, длительность анализа, невозможность автоматизации. Увеличение молекулярной массы вещества затрудняет его определение.
Биотестирование и биоиндикация		
Биологические методы контроля за состоянием ОС, которые позволяют оценивать качество среды, ее токсичность и наличие загрязнений, не обнаруживаемых химико-аналитическими методами	Позволяют выявить изменения в ОС, которые не фиксируются химико-аналитическими методами, дают критически важную информацию о состоянии экосистемы и биологической доступности загрязнителей.	Сложность интерпретации результатов и недостаточная стандартизация. Целесообразность их интеграции с химическими методами.

В условиях ЧС критически важна оперативность получения информации о загрязнении. Система оценки уровня нефтяного загрязнения почв при мониторинге и прогнозировании ЧС, связанных с АРН, должна удовлетворять следующим условиям [14, 15, 20, 21]:

- обеспечивать возможность установления фонового уровня содержания органических веществ в почве;
- не требовать значительных приборно-аналитических и временных затрат, высокой квалификации персонала;
- обеспечивать возможность быстрого обследования протяженных территорий.

В отличие от долгосрочного мониторинга и оценки ущерба, которые требуют высокочувствительных и селективных методик, при реализации предлагаемой системы необходимо использование экспресс-методов для проведения массовых анализов с обработкой полученных результатов вероятностно-статистическими методами. Такие исследования являются принципиальным путем выделения техногенного загрязнения из общего количества органических веществ, присутствующих в ОС [21], позволяя ускорить получение результатов и минимизировать время принятия решений, направленных на предотвращение, выявление и ликвидацию ЧС.

На основании проведенного анализа, представленного в табл. 1, была установлена целесообразность применения ИК-спектроскопического и люминесцентного методов для оперативного контроля и мониторинга ЧС, возникающих при АРН на морском транспорте и сопровождающихся загрязнении ПЗП. Методы имеют аттестованные методики проведения анализа, допущенные для целей государственного экологического контроля [25, 26], и применяются в полевых условиях. Они дополняют друг друга по пределам обнаружения нефти и нефтепродуктов и по номенклатуре определяемых соединений [15].

ИК-спектроскопический метод применен для оценки общего загрязнения и фиксации, в основном, содержания алифатических и легких ароматических углеводородов бензольного ряда. Люминесцентный метод позволяет определить концентрацию в почве всего спектра ароматических соединений (полиароматических (ПАУ) и моноароматических (МАУ) углеводородов), установить степень трансформации и токсичности присутствующих в почве углеводородов. Преобладание ПАУ над МАУ, как правило, свидетельствует в пользу природного фона над свежим техногенным загрязнением почв, фиксирующимся при возникновении ЧС, что связано, главным образом, с различными свойствами рассматриваемых соединений.

МАУ имеют высокую летучесть, хорошо растворимы в воде, легко подвергаются биодеградации, что определяет их быстрое испарение, вымывание и разрушение. Их концентрация значительна сразу после разлива, затем она достаточно быстро уменьшается.

ПАУ обладают низкой летучестью и растворимостью, они устойчивы к биологическому разложению, аккумулируются и сохраняются в почвах и донных отложениях длительное время. Высокое содержание ПАУ может быть связано с наличием старого трансформированного загрязнения. В целом они считаются более токсичными в долгосрочной перспективе.

Результаты оценки нефтяного загрязнения почв ПЗП, полученные двумя представленными методами, связывали между собой с помощью корреляционных зависимостей, представленных в работе [21].

В работах [14, 27] установлено, что большая часть дозовых зависимостей экосистемных параметров имеет вид S-образной кривой. Обработку результатов измерения концентрации нефтепродуктов в почвах

ПЗП проводили с использованием логистической S-образной функции, на которой с помощью критических точек выделяли области, которым давали содержательную интерпретацию (рис. 1). Последовательность обработки результатов измерения концентрации нефтепродуктов в почвах ПЗП приведена на рис. 2.

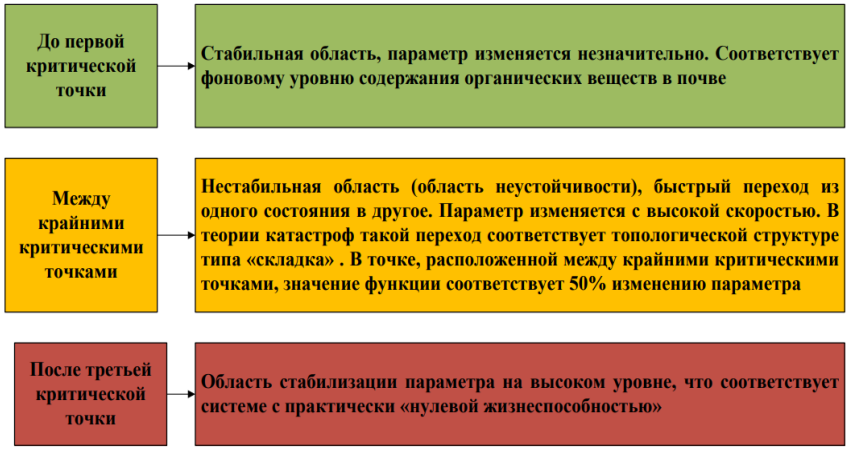


Рис. 1. Характеристика областей, выделяемых на логистической функции



Рис 2. Последовательность обработки результатов измерения концентрации нефтепродуктов в почвах ПЗП

При необходимости идентификации индивидуальных органических загрязнителей в сложных смесях углеводородов нефтяного происхождения целесообразно использовать хроматографические методы анализа. Однако их проведение требует значительных затрат времени и ресурсов, что ограничивает их применение для быстрого обследования протяженных территорий и оперативного контроля возникновения ЧС.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлена последовательность реализации предлагаемой модели оценки уровня нефтяного загрязнения ПЗП при мониторинге и ликвидации последствий ЧС, обусловленных АРН на морском транспорте. Предлагаемая модель отличается от существующих возможностью установления фонового уровня загрязняющих веществ в пробах почвы ПЗП. Сокращение времени, необходимого для оценки загрязнения почв ПЗП, и ускорение процесса принятия решений, направленных на предотвращение, локализацию и ликвидацию последствий ЧС, связанных с АРН на морском транспорте, достигается проведением массовых анализов экспрессными методами с использованием технологии скрининга при отборе проб. Обработка полученных результатов производится вероятностно-статистическими методами.

Проблема АРН в Финском заливе после введения в 2022 году санкций против России стоит особенно остро, что связано с использованием в настоящее время для вывоза на экспорт российской нефти и нефтепродуктов танкеров так называемого «теневого флота» с высокой степенью износа, а также сложными условиями навигации в Балтийском море и увеличившейся частотой аварий в акватории. Симуляция разлива нефти в Финском заливе, подготовленная немецким исследовательским центром Helmholtz Center Hereon [28] на примере танкера Peace, способного перевозить до 110 тыс. тонн нефти за рейс, дала следующие результаты. Установлено, что разлив даже части топлива (48000 тон) с танкера в районе острова Сескар станет катастрофой для региона, что представлено в табл. 2.

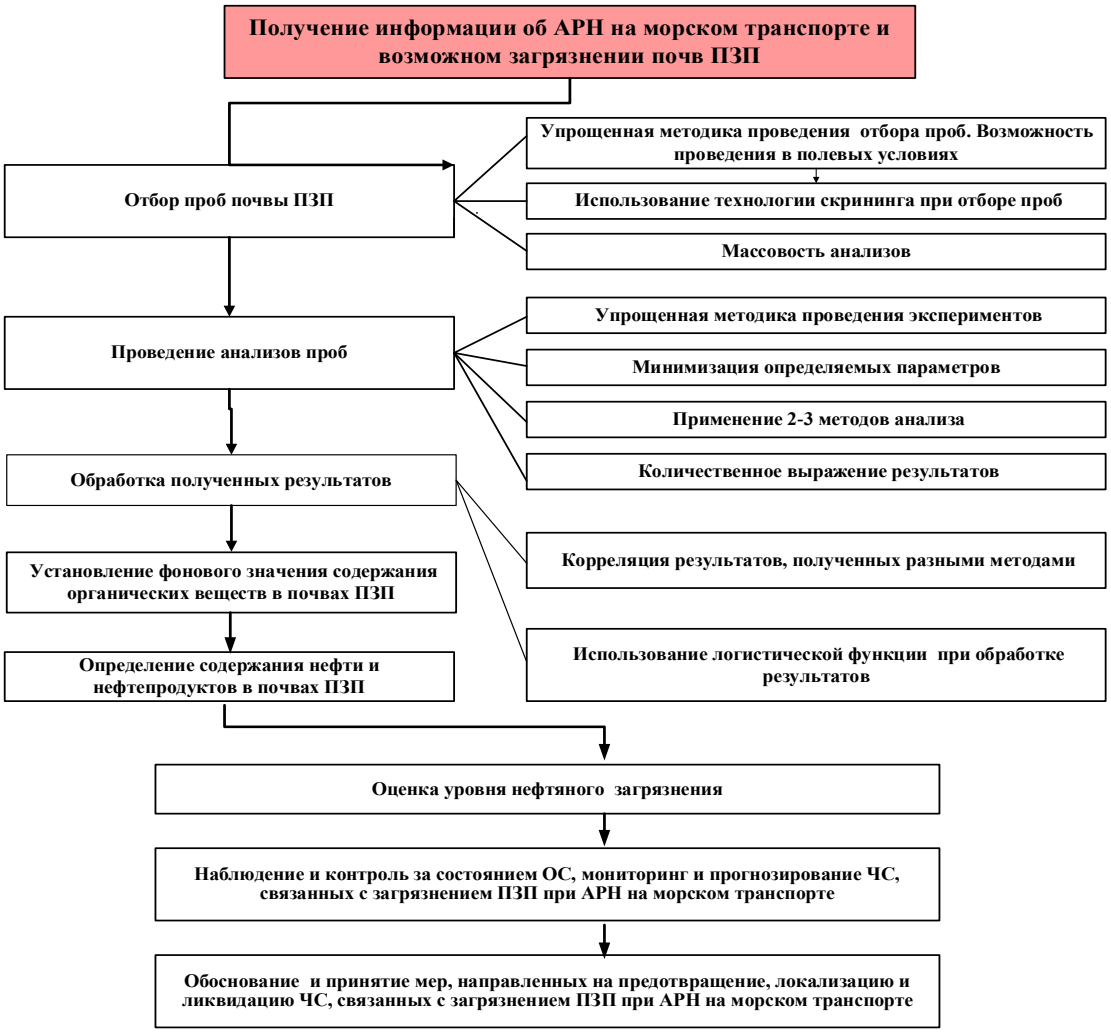


Рис. 3. Последовательность реализации модели оценки уровня загрязнения ПЗП при АРН на морском транспорте

Таблица 2

Результаты моделирования АРН в Финском заливе [28]

Последствия	Описание
Зона загрязнения	Около половины вылившейся нефти достигнет берега в течение 30 дней, загрязнив большую часть побережья Выборгского и Кингисеппского районов.
Уничтожение заповедников	Под угрозой полного уничтожения окажутся природные заказники: Кургальский, Выборгский, Березовый остров.
Влияние на людей	Экологические последствия затронут около 100 тысяч жителей Выборга, Приморска, Высоцка и других прибрежных населенных пунктов.
Угроза Санкт-Петербургу	Вследствие влияния нагонной волны нефтепродукты могут попасть в Неву и достичь водозаборов города, что создаст угрозу для водоснабжения г. Санкт-Петербурга.
Сравнение с другими катастрофами	Масштаб аварии может оказаться в 10-15 раз больше, чем при аварии двух танкеров «Волгонефть» в декабре 2024 года в Черном море

Реализация предлагаемой модели оценки уровня загрязнения ПЗП при АРН на морском транспорте осуществлялась в условиях Финского залива. Получение и обработка экспериментальных данных проводилась в следующей последовательности:

1. Проведен отбор проб на исследуемой территории ПЗП в соответствии с требованиями ГОСТ 17.4.3.01 [29] и ГОСТ 17.4.4.02 [30]. Было отобрано 30 образцов почвы.

2. Суммарное содержание нефти и нефтепродуктов в образцах ПЗП ($C_{НП}$) определено ИК-спектроскопическим методом по методике [25] с использованием ИК-спектрометра «ИНФРАЛЮМ-ФТ-08». В полевых условиях может быть применен экспресс-метод спектроскопии в ближней инфракрасной области (БИК-спектроскопия) с использованием предварительно проградуированного БИК-спектрометра для определения количества и идентификации

загрязнения почв нефтепродуктами в соответствии с ГОСТ 54039 - 2010 [31].

3. Обработка результатов экспериментов проведена с использованием логистической S-образной функции. В работе [14] установлено, что функция распределения изучаемой случайной величины x, равной логарифмам концентраций нефтепродуктов ($\mathrm{x} = \lg \mathrm{C_{НП}}$), измеренным ИК-спектроскопическим методом в образцах почвы ПЗП, может быть представлена сигмоидальной функцией Больцмана:

$$F(\mathrm{x}) = \mathrm{A_2} + \frac{\mathrm{A_1} - \mathrm{A_2}}{1 + \exp^{(x - x_0)/\tau}} \quad (1)$$

где $\mathrm{A_1}, \mathrm{A_2}$ – начальный и конечный уровни функции; $\mathrm{x_0}$ – значение $\lg \mathrm{C_{НП}}$ в точке перегиба, в которой сигмоидальная функция Больцмана наполовину перешла с уровня на уровень;

$\mathrm{C_{НП}}$ – концентрация нефтепродуктов в почвах ПЗП, измеренная ИК-спектроскопическим методом, ppm;

τ – параметр, определяющий ширину области перехода между уровнями.

По результатам проведенных экспериментов установлено, что для почв ПЗП Финского залива сигмоидальная функция Больцмана (1) для исследуемой случайной величины $\mathrm{x} = \lg \mathrm{C_{НП}}$ принимает вид:

$$F(\mathrm{x}) = 1 - \frac{0{,}95}{1 + e^{\frac{x - 2{,}35}{0{,}25}}} \quad (2)$$

Анализ производных функции (2) позволил определить первую, вторую и третью критические точки как значения аргумента при $\mathrm{F''(x)} = max$; $F''(\mathrm{x}) = 0$; $F''(\mathrm{x}) = min$ соответственно (рис. 4).

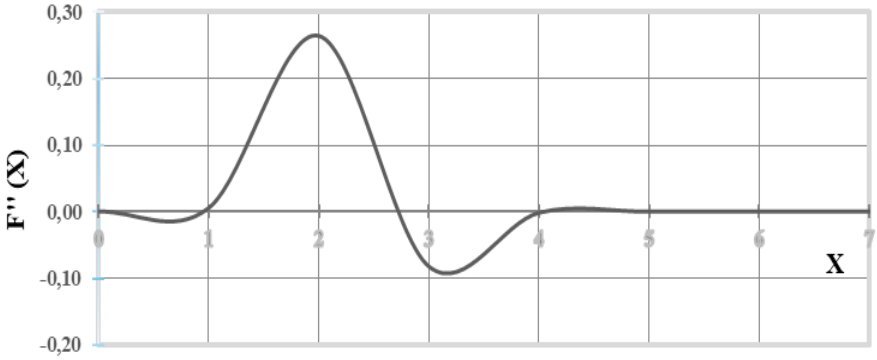


Рис. 4. График второй производной функции распределения случайной величины $\mathrm{x} = lg\mathrm{C_{НП}}$ *в образцах почв ПЗП Финского залива*

4. На основании значений аргумента в критических точках определены параметры оценки уровня нефтяного загрязнения почв ПЗП Финского залива и выделены области концентраций нефти и нефтепродуктов, соответствующие фоновому уровню содержания органических веществ (до первой критической точки), малозагрязненным (между первой и второй критическими точками), среднезагрязненным (между второй и третьей критическими точками) и сильнозагрязненным (после третьей критической точки) почвам. Получены следующие параметры оценки уровня нефтяного загрязнения почв ПЗП Финского залива:

$\mathrm{C_{НП}} < 100\ ppm$ – фоновый уровень загрязнения почв ПЗП, условно чистые почвы,

$100\ ppm \leq \mathrm{C_{НП}} < 500\ ppm$ – малозагрязненные почвы ПЗП;

$500\ ppm \leq \mathrm{C_{НП}} < 1500\ ppm$ – среднезгрязненные почвы ПЗП;

$\mathrm{C_{НП}} \geq 1500\ ppm$ – сильнозагрязненные почвы ПЗП.

При необходимости установить индивидуальный состав загрязняющих веществ в почвах ПЗП необходимо провести анализы на молекулярном уровне. Достаточно детального анализа нескольких образцов из каждой группы (мало-, средне-, сильнозагрязненные почвы).

5. Критерий возникновения экологической ЧС, связанной загрязнением ПЗП при АРН на морском транспорте рассчитывали по формуле:

$$\mathrm{K_{ЧС}} = \frac{\mathrm{C_{НП}}}{\mathrm{C_{НП_{МЗ}}}},$$

где $\mathrm{C_{НП}}$ - измеренная концентрация нефтепродуктов в почве ПЗП;

$\mathrm{C_{НП_{МЗ}}}$ – концентрация нефтепродуктов, соответствующая верхней границе малозагрязненных почв исследуемой ПЗП.

В качестве критерия оценки экологической обстановки и обоснования вывода о возникновения ЧС, связанных с загрязнением ПЗП при АРН на морском транспорте, использовали параметр 10÷20 ПДК [32]. Учитывая, что значение суммарного ПДК для нефти и нефтепродуктов в почве не установлено, за ПДК принимали значение аргумента во второй критической точке [33], являющейся границей мало- и среднезагрязненных почв ПЗП. Таким образом, при $\mathrm{K_{ЧС}} \geq 10 \div 20$ на рассматриваемой территории ПЗП возникает экологическая ЧС. Для условий ПЗП Финского залива:

$$\mathrm{K_{ЧС}} \geq 5000\ ppm.$$

Проведенные исследования продолжают научные работы по разработке принципов локального и регионального нормирования содержания нефти и нефтепродуктов в почвах [14, 15, 18, 20, 21, 27] и отличаются научно-обоснованным использованием полученных результатов при мониторинге состояния ПЗП в случаях АРН на морском транспорте. Установление фоновых значений содержания органических веществ в почвах ПЗП позволяет повысить обоснованность оценки качества почв ПЗП, учесть их территориальные особенности. Представленные результаты хорошо согласуются с результатами работы [33] в области установления численных

значений критериев возникновения ЧС на рассматриваемом участке ПЗП.

Модель реализована на ПЗП Финского залива. Ее применение позволит ускорить принятие обоснованных решений, направленных на предотвращение, локализацию и ликвидацию последствий ЧС, связанных АРН на морском транспорте.

Заключение

В работе проведен анализ аварий на морском транспорте, связанных загрязнением ПЗП при АРН на морском транспорте. Установлено, что они представляют серьезную угрозу морским и прибрежным экосистемам, вызывая как немедленные, так и долгосрочные последствия.

Определена ключевая роль в оценке уровня загрязнения лабораторных методов количественного и качественного анализа проб почвы, проведен их анализ. Обоснована целесообразность применения ИК-спектроскопического и люминесцентного методов для оперативного контроля и мониторинга ЧС, связанных с АРН на морском транспорте.

Разработана и реализована в условиях Финского залива модель оценки уровня загрязнения почв ПЗП при АРН на морском транспорте. Обоснована последовательность обработки экспериментальных данных, полученных при определении концентрации нефтепродуктов в почвах ПЗП ИК-спектроскопическим методом, с использованием логистической S-образной функции. Установлен критерий возникновения экологических ЧС, связанных с загрязнением ПЗП при АРН на морском транспорте. Применение предлагаемой модели позволяет сократить временные и материальные затраты на проведение мониторинга за счет использования экспрессных методов анализа, устанавливать фоновое содержание органических веществ в почвах ПЗП, классифицировать их по уровню нефтяного загрязнения, выявлять новые разливы, сравнивать участки ПЗП по степени нефтяного загрязнения.

Получены параметры оценки уровня нефтяного загрязнения почв ПЗП в условиях Финского залива. Установлено, что фоновое значение концентрации загрязняющих углеводородных веществ в почвах ПЗП Финского залива составляет 100 ppm; при увеличении $C_{НП} > 5000$ ppm на изученной территории складывается экологическая ЧС.

Литература

1. Trainiti G. M., Cianelli D., Piscopo V., Zambianchi E. Oil spill model in the Gulf of Naples following collision events // Ocean Engineering. 2025. Vol. 342, Part 3. P.123081. DOI 10.1016/j.scitotenv.2024.178025.
2. Асон Т. А. Перспективы развития мирового рынка нефти // Вестник евразийской науки. 2019. №2. [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-mirovogo-rynka-nefti (дата обращения: 09.03.2026).
3. Oil Tanker Spill Statistics 2025, International Tanker Owners Pollution Federation Limited. ITOPF, 2025. URL: https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/oil-tanker-spill-statistics-2025/ (дата обращения 23.02.2026).
4. Huynh D. N. L., Nguyen X. P., Pham N. D. K., Le T. T., Tran X. T., Saengsupavanich C., Hoang A. T. Booms and skimmers for oil spill recovery: Perspective analysis from lab scale to practical applications // Marine Pollution Bulletin. 2026. Vol. 224. P. 119128. DOI 10.1016/j.marpolbul.2025.119128.
5. Ulker D., Burak S. Comprehensive oil spill transport and weathering modelling in high-shipping-density areas of industrialized bay // Process Safety and Environmental Protection. 2025. Vol. 203, Part B. P. 108007. DOI 10.1016/j.psep.2025.108007.
6. Ермолов А. А., Илюшин Д. Г., Кизяков А. И. и др. Геоморфологический анализ и оценка экологической чувствительности берегов западных арктических морей России к разливам нефти / // Морские исследования и образование (MARESEDU-2021): Труды X Международной научно-практической конференции, Москва, 25–29 октября 2021 года. Том III (III). – Тверь: Общество с ограниченной ответственностью "ПолиПРЕСС", 2021. – С. 346-348.
7. Сутормин Д. А. Активные меры защиты при аварийных разливах нефти // Актуальные исследования. – 2026. – №8 (294), Ч.I. – С. 55-58. [Электронный ресурс]. URL: https://apni.ru/article/14488-aktivnye-mery-zashity-pri-avarijnyh-razlivah-nefti (дата обращения 05.03.2026).
8. Абдурагимов И. М. Очередная экологическая катастрофа в результате аварии на нефтяной платформе компании «British Petroleum» в Мексиканском заливе // Пожаровзрывобезопасность. 2012. №2. С.81-84.
9. Пророк В. Я., Трофимец В. Я., Елейменов А .В. Мониторинг распространения нефтяных загрязнений акваторий на объектах нефтегазового комплекса // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2018. – № 1. – С. 41-45.
10. Результаты исследований условий окружающей среды в районе аварии танкера «Надежда» (прибрежные воды Татарского пролива у юго-западного Сахалина) / Т. Г. Коренева, Г. В. Шевченко, В. Е. Марыжихин [и др.] // Вода: химия и экология. – 2017. – № 11-12(113). – С. 3-13.
11. Крупные разливы нефти и нефтепродуктов в России в 1994-2021 годах. [Электронный ресурс]. URL: https://ria.ru/20210811/razliv-1745316414.html (дата обращения 03.01.2026).
12. Хроника самого крупного экологического бедствия века: что происходит в Анапе. [Электронный ресурс]. URL: https://ki-news.ru/article/hronika-samogo-krupnogo-ekologicheskogo-bedstviya-veka-chto-proishodit-v-anape/?ysclid=mmjcrhvmot974266410 (дата обращения 01.02.2026).
13. Водный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон РФ от 03.06.2006 г. № 74-ФЗ (ред. от 29.12.2025) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2026). [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/ (дата обращения 10.03.2026).

14. Макоско А. А., Королева Л. А., Малыгин И. Г., Таранцев А. А., Зайкин Р. Г. Обоснование метода нормирования уровня нефтяного загрязнения почв на территории объектов добычи и транспортировки нефти в Арктической зоне // Арктика: экология и экономика. – 2024. – Т. 14, № 4. – С. 585-595. DOI 10.25283/2223-4594-2024-4-585-595.
15. Зайкин Р. Г. Обоснование концепции селективного обнаружения техногенного нефтяного загрязнения на фоне содержащихся в почвах органических веществ // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2024. – № 3(71). – С. 175-185. DOI 10.61260/1998-8990-2024-3-175-185.
16. Зуева И. Н., Глязнецова Ю. С., Чалая О. Н., Лифшиц С. Х. Методы органической геохимии при мониторинге нефтезагрязнений и ремидиации почв // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. №1-4. [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metody-organicheskoy-geohimii-pri-monitoringe-neftezagryazneniy-i-remidiatsii-pochv (дата обращения: 08.03.2026).
17. Sharma K., Shah G., Singh H., Bhatt U., Singhal K., Soni V. Advancements in natural remediation management techniques for oil spills: Challenges, innovations, and future directions // Environmental Pollution and Management. 2024. Vol. 1. P. 128-146. DOI 10.1016/j.epm.2024.08.003.
18. Быкова М. В. Проблема нормирования при оценке уровня загрязнения почв нефтепродуктами // Вестник евразийской науки. 2019. № 6. [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/problema-normirovaniya-pri-otsenke-urovnya-zagryazneniya-pochv-nefteproduktami (дата обращения 09.09.2025).
19. Кистанова О. А., Анпилогов В. Н., Герасимова Л. А. Рекультивация почв, загрязненных нефтепродуктами // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2011. №7. с. 234-235.
20. Околелова А. А. Принципы нормирования нефтепродуктов в почве // ЕГИ. 2017. №3 (17). С. 6-16.
21. Зайкин Р. Г., Королева Л. А., Петров Ю. С. Корреляционный анализ силы связи между результатами мониторинга аварийного нефтяного загрязнения почв скрининговыми методами // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 2(70). С. 84-94. DOI 10.61260/1998-8990-2024-2-84-94.
22. Гладилович В. Д., Подольская Е. П. Возможности применения метода ГХ-МС (обзор) // Научное приборостроение. 2010. Т.20, №4. С. 36–49.
23. Сивцев С. И., Александров А. Р., Ерофеевская Л. А. Применение ядерно-магнитной резонансной спектроскопии для анализа нефтепродуктов // Eurastrencold - 2025. 2025. №1.С/530-533. DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-530-533/.
24. Ступакова Г. А., Игнатьева Е. Э., Лапушкина А. А., Щиплецова Т. И., Митрофанов Д. К., Ветрова Е. Ю. Анализ методов определения нефтепродуктов в почве при разных уровнях ее загрязнения// Плодородие. 2024. №5. С. 86-89. DOI: 10.25680/S19948603.2024.140.18.
25. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органогенных, органоминеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектрометрии. ПНД Ф 16.1:2.2.22-98 (Издание 2005 г.). [Электронный ресурс]. URL: https://ohranatruda.ru/ (дата обращения: 03.03.2023).
26. Методика выполнения измерения массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом на анализаторе жидкости “Флюорат 02” (М 03-03-2012). ПНД Ф 16.1:2.21-98 (издание 2012 г.). [Электронный ресурс]. URL: https://ohranatruda.ru/ (дата обращения 01.01.2024).
27. Воробейчик Е. Л., Садыков О. Ф, Фарафонтов М. Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений земных экосистем (локальный уровень). — Екатеринбург: Наука, 1994. — 282 с.
28. Разлив нефти с одного танкера «теневого флота» в Финском заливе затронет 100 тысяч человек и уничтожит несколько заказников — Greenpeace. [Электронный ресурс]. URL: https://pqyxpopo---romecifp-vaa6o7gpmq-ez.a.run.app/news/289581.
29. ГОСТ 17.4.3.01-2017 Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. - Москва: Стандартинформ, 2018. – 6 с.
30. ГОСТ 17.4.4.02-2017 Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа (с поправками, с изменением № 1 ред. от 14.02.2024). [Электронный ресурс]. URL: https://gostassistent.ru/ (дата обращения 14.03.2026).
31. ГОСТР 54039 - 2010 Качество почв. Экспресс-метод ИК-спектроскопии для определения количества и идентификации загрязнения почв нефтепродуктами- Москва: Стандартинформ, 2011. – 6 с.
32. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия.: Утв. Минприроды РФ 30 ноября 1992 года – М., 1992.
33. Левич А. П., Булгаков Н. Г., Рисник Д. В., Максимов В. Н. Биоиндикация, экологическая диагностика и нормирование в методах мониторинга пресноводных экосистем // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем: Сборник материалов II Международной конференции, 10-14 октября 2011. Санкт-Петербург. [Электронный ресурс]. URL: http://ecograde.bio.msu.ru/library/articles/levich%20s-p.pdf.

References

1. Trainiti G.M., Cianelli D., Piscopo V., Zambianchi E. Oil spill model in the Gulf of Naples following collision events // Ocean Engineering. 2025. Vol. 342, Part 3. P.123081. DOI 10.1016/j.scitotenv.2024.178025.
2. Асон Т. А. Перспективы развития мирового рынка нефти // Вестник евразийской науки. 2019. №2. [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-mirovogo-rynka-nefti (дата обращения: 09.03.2026).
3. Oil Tanker Spill Statistics 2025, International Tanker Owners Pollution Federation Limited. ITOPF, 2025. URL: https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/oil-tanker-spill-statistics-2025/ (дата обращения 23.02.2026).

4. Huynh D. N. L., Nguyen X. P., Pham N. D. K., Le T. T., Tran X. T., Saengsupavanich C., Hoang A. T. Booms and skimmers for oil spill recovery: Perspective analysis from lab scale to practical applications // Marine Pollution Bulletin. 2026. Vol. 224. P. 119128. DOI 10.1016/j.marpolbul.2025.119128.
5. Ulker D., Burak S. Comprehensive oil spill transport and weathering modelling in high-shipping-density areas of industrialized bay // Process Safety and Environmental Protection. 2025. Vol. 203, Part B. P. 108007. DOI 10.1016/j.psep.2025.108007.
6. Ermolov A. A., Ilyushin D. G., Kizyakov A. I. and others. Geomorphological analysis and assessment of the ecological sensitivity of the shores of the Western Arctic seas of Russia to oil spills / // Marine Research and Education (MARESEDU-2021): Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference, Moscow, October 25-29, 2021. Volume III (III). Tver: Limited Liability Company "PoliPRESS", 2021. pp. 346-348.
7. Sutormin D. A. Active protection measures in case of emergency oil spills // Current research. – 2026. – №8 (294), Part I. – pp. 55-58. [electronic resource]. URL: https://apni.ru/article/14488-aktivnye-mery-zashity-pri-avarijnyh-razlivah-nefti (accessed 03/05/2026).
8. Abduragimov I. M. Another environmental disaster as a result of the accident on the British Petroleum oil platform in the Gulf of Mexico // Fire and explosion safety. 2012. No. 2. pp.81-84.
9. The Prophet V. Ya., Trofimets V. Ya., Eleimenov A.V. Monitoring the spread of oil pollution in the water areas at the facilities of the oil and gas complex // Environmental protection in the oil and gas complex. 2018. No. 1. pp. 41-45.
10. Results of studies of environmental conditions in the area of the tanker Nadezhda accident (coastal waters of the Tatar Strait off southwestern Sakhalin) / T. G. Koreneva, G. V. Shevchenko, V. E. Maryzhikhin [et al.] // Water: chemistry and ecology. – 2017. – № 11-12(113). – Pp. 3-13.
11. Major oil and petroleum product spills in Russia in 1994-2021. [electronic resource]. URL: https://ria.ru/20210811/razliv-1745316414.html (accessed 03.01.2026).
12. Chronicle of the largest environmental disaster of the century: what is happening in Anapa. [electronic resource]. URL: https://ki-news.ru/article/hronika-samogo-krupnogo-ekologicheskogo-bedstviya-veka-chto-proishodit-v-anape/?ysclid=mmjcrhvmot974266410 (accessed 02/01/2026).
13. Water Code of the Russian Federation: Federal Law of the Russian Federation No. 74-FZ dated 06/03/2006 (as amended on 12/29/2025) (as amended and supplemented, intro. effective from 03/01/2026). [electronic resource]. URL: https://www.consultant.ru / (accessed 03/10/2026).
14. Makosko A. A., Koroleva L. A., Malygin I. G., Tarantsev A. A., Zaikin R. G. Substantiation of the method of rationing the level of oil pollution of soils on the territory of oil production and transportation facilities in the Arctic zone // Arctic: ecology and economics. - 2024. – Vol. 14, No. 4. – pp. 585-595. DOI 10.25283/2223-4594-2024-4-585-595.
15. Zaikin R. G. Substantiation of the concept of selective detection of technogenic oil pollution against the background of organic substances contained in soils // Problems of risk management in the technosphere. – 2024. – № 3(71). – Pp. 175-185. DOI 10.61260/1998-8990-2024-3-175-185.
16. Zueva I. N., Glyanetsova Yu.S., Chalaya O. N., Lifshits S. H. Methods of organic geochemistry in monitoring oil pollution and soil remidiation // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2010. №1-4. [electronic resource]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metody-organicheskoy-geohimii-pri-monitoringe-neftezagryazneniy-i-remidiatsii-pochv (date of request: 03/08/2026).
17. Sharma K., Shah G., Singh N., Bhatt U., Singhal K., Soni V. Advances in natural remediation management techniques for oil spills: Challenges, innovations, and future directions // Environmental Pollution and Management. 2024. Vol. 1. P. 128-146. DOI 10.1016/J.epm.2024 .08.003.
18. Bykova M. V. The problem of rationing in assessing the level of soil pollution by petroleum products // Bulletin of Eurasian Science. 2019. No. 6. [Electronic resource]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/problema-normirovaniya-pri-otsenke-urovnya-zagryazneniya-pochv-nefteproduktami (accessed 09.09.2025).
19. Kistanova O. A., Anpilogov V. N., Gerasimova L. A. Recultivation of soils contaminated with petroleum products // Actual problems of aviation and cosmonautics. 2011. No. 7. pp. 234-235.
20. Okolelova A. A. Principles of rationing of petroleum products in soil // EGI. 2017. No. 3 (17). pp. 6-16.
21. Zaikin R. G., Koroleva L. A., Petrov Yu.S. Correlation analysis of the strength of the relationship between the results of monitoring emergency oil pollution of soils by screening methods // Problems of risk management in the technosphere. 2024. No. 2(70). pp. 84-94. DOI 10.61260/1998-8990-2024-2-84-94.
22. Gladilovich V. D., Podolskaya E. P. Possibilities of using the GC-MS method (review) // Scientific instrument engineering. 2010. Vol.20, No. 4. pp. 36-49.
23. Sivtsev S. I., Alexandrov A. R., Erofeevskaya L. A. Application of nuclear magnetic resonance spectroscopy for the analysis of petroleum products // Eurastrencold - 2025. 2025. No. 1.C/530-533. DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-530-533/.
24. Stupakova G. A., Ignatieva E. E., Lapushkina A. A., Shchipletsova T. I., Mitrofanov D. K., Vetrova E. Y. Analysis of methods for the determination of petroleum products in soil at different levels of its contamination// Fertility. 2024. No.5. pp. 86-89. DOI: 10.25680/S19948603.2024.140.18.
25. Methodology for measuring the mass fraction of petroleum products in mineral, organogenic, organomineral soils and bottom sediments by IR spectrometry. HDPE F 16.1:2.2.22-98 (2005 edition). [Electronic resource]. URL: https://ohranatruda.ru / (date of access: 03.03.2023).
26. A method for measuring the mass fraction of petroleum products in soil and soil samples using the fluorimetric method on a liquid analyzer “Fluorat 02” (M 03-03-2012). HDPE F 16.1:2.21-98 (2012 edition). [Electronic resource]. URL: https://ohranatruda.ru / (accessed 01.01.2024).
27. Vorobeychik E. L., Sadykov O. F., Farafontov M. G. Ecological rationing of anthropogenic pollution of terrestrial ecosystems (local level). Yekaterinburg: Nauka Publ., 1994. 282 p.

28. Oil spill from one tanker of the "shadow fleet" in the Gulf of Finland will affect 100,000 people and destroy several sanctuaries — Greenpeace. [electronic resource]. URL: https://pqyxpopo---romecifp-vaa6o7gpmq-ez.a.run.app/news/289581.
29. GOST 17.4.3.01-2017 Nature protection. Soils. General requirements for sampling. - Moscow: Standartinform, 2018. – 6 p.
30. GOST 17.4.4.02-2017 Nature protection. Soils. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis (as amended, with amendment No. 1 ed. dated 02/14/2024). [electronic resource]. URL: https://gostassistent.ru / (date of reference 03/14/2026).
31. GOSTR 54039 - 2010 Soil quality. Express method of IR spectroscopy for determining the amount and identification of soil contamination with petroleum products - Moscow: Standartinform, 2011. – 6 p.
32. Criteria for assessing the ecological situation of territories to identify zones of ecological emergency and zones of ecological disaster.: Approved by the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation on November 30, 1992, Moscow, 1992.
33. Levich A. P., Bulgakov N. G., Risnik D. V., Maksimov V. N. Bioindication, environmental diagnostics and rationing in monitoring methods freshwater ecosystems // Bioindication in monitoring freshwater ecosystems: Proceedings of the II International Conference, October 10-14, 2011. Saint-Petersburg. [electronic resource]. URL: http://ecograde.bio.msu.ru/library/articles/levich%20s-p.pdf.

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

Королева Людмила Анатольевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект 149; ведущий научный сотрудник лаборатории проблем экологии транспортных систем, ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13. Тел. +7(952) 249-63-53, e-mail: lyudamil@mail.ru

Lyudmila A. Koroleva, Dr.Sci. (Eng), assistant professor, professor of the Department of Fire, Emergency Rescue Equipment and Automotive Industry, Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia, Moskovsky Prospekt, 149, St. Petersburg, 196105, Russian Federation. Leading researcher of the Laboratory of Ecology of transport systems, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th Line VO, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. Tel. +7(952) 249-63-53, e-mail: lyudamil@mail.ru

Малыгин Игорь Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, директор, ФГБУН 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, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149; тел.+7(812)323-29-54, e-mail: malygin_com@mail.ru

Igor G. Malygin, professor, Dr. Sci. (Eng), 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 State University of EMERCOM of Russia, 149 Moskovsky Prospekt, 196105, Saint Petersburg; tel. +7(812)323-29-54 , e-mail: malygin_com@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 06.07.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.07.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 22.07.2026.

Научная статья
УДК 656.6, 519.2
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.064

О нахождении закона распределения для выборки случайных величин и их генерация

Таранцев А.А.[1] t__54@mail.ru
[1]Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, Россия.

Аннотация. Рассмотрена проблема нахождения закономерностей в статистических данных для выбора закона распределения из большого количества известных законов. Для решения этой задачи предложено использовать чашевидную диаграмму «асимметрия-эксцесс», в которой приведены области применимости законов распределения. Предложены двухбуквенные обозначения законов распределения случайных величин. Особое внимание уделено *β*-распределению, в т.ч. 1-го и 2-го рода. Показано, что наиболее универсальным законом распределения является *β*-распределение 1-го рода, как положительно зарекомендовавшего себя при решении прикладных задач и приведены соответствующие примеры. Получены математические выражения для нахождения параметров для плотности *β*-распределения. Рассмотрена обратная задача: генерирование потока случайных величин, имеющего заданные значения матожидания и коэффициентов вариации, асимметрии и эксцесса, с использованием специальной гистограммы и приведен порядок её построения. Сгенерированная выборка случайных величин может применяться в задачах моделирования параметров перевозочного процесса морскими и речными судами. Сформулированы направления дальнейших исследований.
Ключевые слова: статистические данные, случайные величины, законы распределения, гистограммы, генерирование случайных величин.
Благодарности: автор выражает благодарность профессору Дмитрию Алексеевичу Скороходову за ценные рекомендации.
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. О нахождении закона распределения для выборки случайных величин и их генерация Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 344—350. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.064

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.064

Finding the distribution law for a sample of random variables and their generation

Alexander A. Tarantsev[1] t__54@mail.ru
[1]Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences.

Abstract. The problem of finding patterns in statistical data for selecting a distribution law from a large number of known laws is considered. To solve this problem, it is proposed to use a cup-shaped asymmetry-kurtosis diagram, which shows the areas of applicability of distribution laws. Two-letter designations of random variable distribution laws are proposed. Particular attention is paid to β-distribution, including 1st and 2nd type. It is shown that the most universal distribution law is the β-distribution of the 1st kind, which has proven itself positively in solving applied problems, and relevant examples are given. Mathematical expressions are obtained for finding parameters for density of β-distribution. The inverse problem is considered: generation of a stream of random variables having given values of expectation and coefficients of variation, asymmetry and kurtosis, using a special histogram and the order of its construction is given. The generated sample of random variables can be used in the tasks of modeling the parameters of the transportation process by sea and river vessels. Directions for further research are formulated.
Keywords: statistics, random variables, distribution laws, histograms, generation of random variables.
Thanks: the author expresses gratitude to Professor Dmitry A. Skorokhodov for valuable recommendations.
Financial Support: the work was carried out as part of the execution of the state assignment of the IPT RAS No. 075-00605-26-00 for 2026 and the planning period of 2027 and 2028 at the expense of the subsidies provided by the Ministry of Education and Science of Russia (agreement on the provision of subsidies from the federal budget for financial support of the implementation of the state assignment from 20.01.2026 No. 075-03-2026-498).
For citation: Alexander A. Tarantsev. On finding the distribution law for a sample of random variables and their generation, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 344—350. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.064

Введение

Морские грузоперевозки занимают видное место в общем объёме грузоперевозок в РФ. В частности, по данным Минтранса за 10 месяцев 2025 г., морским транспортом перевезли около 78% внешнеторговых грузов России, причём в экспорте доля достигала 82%. Обеспечение устойчивости и оптимизации

© Таранцев А.А. 2026

перевозочного процесса требует постоянного решения задач планирования и моделирования, что обусловливает актуальность накопления и анализа статистических данных об этих процессах, Рассмотрению и решению таких задач посвящено большое количество публикаций, например, [1-3]. Важной составляющей исследования перевозочных процессов является сбор, обработка и анализ статистических данных, что предполагает нахождение законов распределения случайных величин (СВ) [4-6] и их последующее использование в задачах моделирования и оптимизации.

Случайные величины и законы распределения

К настоящему времени известно большое количество законов распределения непрерывных СВ (по данным [5, 6] порядка шестидесяти), которые могут соответствовать выборкам случайных величин $X=\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$. Каждая выборка *X* характеризуется начальными моментами $\{\alpha\}_в$, определяемыми по выражениям [4]:

$$\alpha_k = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i x_i^k}{\sum_{i=1}^{N} w_i}, k \geq 0, \quad (1)$$

где *N* – размер выборки *X*; w_i – «вес» *i*-го компонента выборки *X* ($0 \leq w_i \leq 1$), очевидно: при $w_1 = \dots = w_N = 1$ знаменатель обращается в *N* (для справки: $\alpha_0 \equiv 1, \alpha_1 = \mathrm{Mx}_в$ – математическое ожидание).

Из моментов {*α*} формируются важные безразмерные характеристики выборки *X*: коэффициенты вариации $\mathrm{Kv}_в$, асимметрии $\mathrm{As}_в$ и эксцесса $\mathrm{Ex}_в$ (индекс «в» соответствует выборке) [6]:

$$\begin{cases} \mathrm{Kv}_в = \sqrt{\alpha_2 - \alpha_1^2} \cdot \mathrm{Mx}_в^{-1}, \ \mathrm{Mx}_в \neq 0, \\ \mathrm{As}_в = (\alpha_3 - 3\alpha_1\alpha_2 + 2\alpha_1^2)(\alpha_2 - \alpha_1^2)^{-1,5}, \\ \mathrm{Ex}_в = (\alpha_4 - 4\alpha_1\alpha_3 + 6\alpha_1^2\alpha_2 - 3\alpha_1^4)(\alpha_2 - \alpha_1^2)^{-2} - 3, \end{cases} \quad (2)$$

которые достаточно полно характеризуют выборку *X*.

Между моментами {*α*} и коэффициентами Kv, As и Ex существует взаимосвязь [4, 6]:

$$\begin{cases} \alpha_2 = \mathrm{Mx}^2(1 + \mathrm{Kv}^2), \\ \alpha_3 = \mathrm{Mx}^3(1 + 3\mathrm{Kv}^2 + \mathrm{AsKv}^3), \\ \alpha_4 = \mathrm{Mx}^4[1 + 6\mathrm{Kv}^2 + 4\mathrm{AsKv}^3 + \mathrm{Kv}^4(\mathrm{Ex} + 3).] \end{cases} \quad (3)$$

С другой стороны, законы распределения непрерывных СВ также могут характеризоваться начальными моментами [4-6]:

$$\alpha_k = \int_{-\infty}^{+\infty} x^k \varphi(x) dx, k \geq 0, \quad (4)$$

где $\varphi(x)$ – плотность распределения (неотрицательная функция); $\int_{-\infty}^{x} \varphi(x) dx = F(x) \in [0; 1]$ – функция распределения (неубывающая); как и ранее, $\alpha_0 \equiv 1, \alpha_1 = \mathrm{Mx}_з$ (индекс «з» соответствует закону распределения).

Одной из принципиальных задач является выбор такого закона распределения [5, 6] случайной величины, чтобы он максимально соответствовал выборке *X*. Как правило, это осуществляется либо по априорной информации (почти каждому закону распределения соответствует реальный процесс), либо по виду гистограммы *G*(*L*) [4, 6] (*L* - число разрядов гистограммы), построенной по выборке *X*, либо волевым путём.

Для облегчения задачи нахождения закона распределения в работе [6] приведена специальная диаграмма, на которой в координатах «асимметрия-эксцесс» (As, Ex) представлены известные законы распределения СВ – см. рис.1. В работе [6] также предложено обозначать законы распределения двумя латинскими буквами (по аналогии с химическими элементами), в некоторых случаях - греческими буква с верхними индексами.

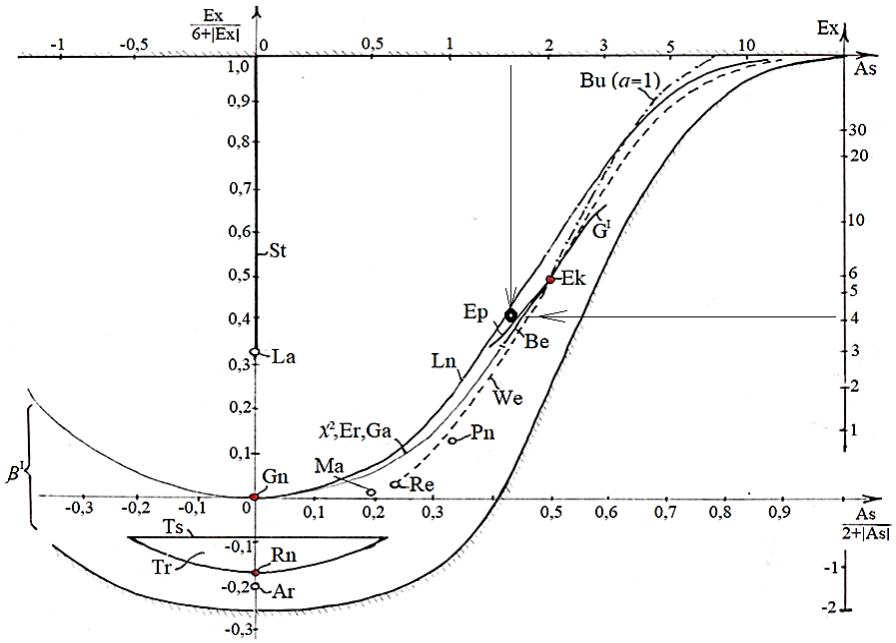


Рис.1. Диаграмма «асимметрия – эксцесс» для выбора закона распределения выборки СВ по величинам {As, Ex}. Обозначения законов распределения согласно [6]

Согласно [5], законы распределения различаются по диапазону СВ и по числу параметров *M*. Например, экспоненциальный закон 'Ek" имеет один параметр (*M*=1) и задан на положительной полуоси: *x*>0; нормальный закон (Гаусса-Лапласа) "Gn" задан на всём диапазоне от -∞ до +∞ и имеет два параметра (*M*=2) – матожидание Mx и дисперсию *D*; распределение бета 1-рода "β^I" имеет четыре параметра (*M*=4) и задано на отрезке [*a*, *b*]. Некоторые законы распределения СВ в координатах «диапазон – число параметров *M*» представлены в таблице 1.

Таблица 1

Некоторые законы распределения в координатах «диапазон СВ – число параметров закона»

M	Диапазон *x*		
	x ϵ (-∞,+∞)	*x* > 0	*x* ϵ [*a*, *b*]
1		De, Ek, Ma, Pn, Re, χ^2, Zf	Lr, Si
2	Ch, Cy, Ee, Gn, La, Lo, St	Be, Bu, Ep, Er, Ga, G^I, Ln, Mn, Na, Pr, Re, Wa, We	Ar, Ec, Kr, Pb, Rn
3	Gu	E^I, E^{II}, Wg	Lt, Sr, Ts
4		Gk, β^{II}	Dp, Gs, Tr, β^I

Примечание: Обозначения законов распределения согласно [6]

После выбора закона распределения проводится оценка его согласованности с выборкой *X*, которая осуществляется, как правило, по критериям Пирсона и Колмогорова [4, 6] с определением доверительной вероятности согласованности. При этом критерий Колмогорова наиболее «мягкий», но не учитывает число *M*, а критерий Пирсона наиболее «жёсткий» и неприменим при *L*-*M*≤1.

В работе [6] предложен ещё один критерий согласованности выборки СВ и подобранного закона распределения – по их характеристикам:

$$q_M = [1 + u_1(1 + \mathrm{Mx_з}\Delta\mathrm{Mx}^{-1})^{-1} + u_2\Delta\mathrm{Kv} + u_3\Delta\mathrm{As} + u_4\Delta\mathrm{Ex}]^{-1}, \quad (5)$$

где ΔMx=|Mxз–Mxв|; ΔKv=|Kvз–Kvв|; ΔAs=|Asз–Asв|; ΔEx=|Exз–Exв|; {*u*} – безразмерные весовые коэффициенты, выбираемые экспертными методами, в первом приближении можно полагать: u_1= u_2= u_3= u_4=0,25.

Из выражения (5) следует, что при $q_M \to 1$ выполняется условие

$$[\mathrm{Mx_в}, \mathrm{Kv_в}, \mathrm{As_в}, \mathrm{Ex_в}]^T = [\mathrm{Mx_з}, \mathrm{Kv_з}, \mathrm{As_з}, \mathrm{Ex_з}]^T, \quad (6)$$

т.е. имеет место совпадение моментов выборки *X* и подобранного закона распределения, а при $q_M \to 0$ наоборот. Критерий (5) идеально применим для законов распределения, у которых *M*=4. Как видно из таблицы 1, это *β*-распределения, трапециедальный (Tr), усеченный нормальный (Gs) и дробно-полиномиальный (Dp) законы [6].

В данной статье рассмотрим возможности применения *β*-распределения к задачам идентификации выборок СВ.

Результаты исследования и их обсуждение

1.Функция плотности *β*-распределения 1-го рода (β^I) для общего случая имеет вид:

$$\varphi_1(x) = K_{mn}\frac{(x-a)^{m-1}(b-x)^{n-1}}{(b-a)^{m+n-1}}, \quad (7)$$

где *a*, *b* – границы области возможных значений случайной величины; *x*∈[*a*, *b*]; *m*, *n* – параметры формы, необязательно целые; K_{mn} – коэффициент обратно пропорциональный *β*-функции B(*m*,*n*) [5, 6], причём K_{mn}=(*m*+*n*-1)![(*m*-1)!(*n*-1)!]$^{-1}$ для целых *m* и *n*.

β-распределение 1-го рода, как и другие распределения, может быть охарактеризовано 4-мя показателями: математическим ожиданием $\mathrm{Mx_1}$ и коэффициентами вариации $\mathrm{Kv_1}$, асимметрии $\mathrm{As_1}$ и эксцесса $\mathrm{Ex_1}$, которые формируются параметрами *a*, *b*, *m* и *n* [5, 6]:

$$\begin{cases} \mathrm{Mx_1} = \frac{an+bm}{m+n}; \\ \mathrm{Kv_1} = \frac{b-a}{bm+an}\sqrt{\frac{mn}{m+n+1}}; \\ \mathrm{As_1} = 2\frac{n-m}{m+n+2}\sqrt{\frac{m+n+1}{mn}}; \\ \mathrm{Ex_1} = 6\frac{(n-m)^2(m+n+1)-mn(m+n+2)}{mn\,(m+n+2)(m+n+3)}; \end{cases} \quad (8)$$

Зная численные значения аналогичных показателей $\mathrm{Mx_в}$, $\mathrm{Kv_в}$, $\mathrm{As_в}$ и $\mathrm{Ex_в}$ для выборки *X*, требуется решить задачу синтеза, т.е. подобрать такие параметры *a*, *b*, *m* и *n* *β*-распределения 1-го рода, чтобы выполнялось условие (6). В результате алгебраических преобразований получены выражения [7, 8]:

$$\begin{bmatrix} m \\ n \end{bmatrix} = \frac{U}{2}\left[1 \mp \frac{\mathrm{As_в}(U+2)}{\sqrt{16(U+1)+\mathrm{As_в}^2(U+2)^2}}\right], \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \mathrm{Mx_в}\left[1 \mp \mathrm{Kv_в}\sqrt{\left(\frac{n}{m}\right)^{\mp 1}(U+1)}\right] \quad (10)$$

где $U = 6\frac{2-\mathrm{As_в}^2+\mathrm{Ex_в}}{3\mathrm{As_в}^2-2\mathrm{Ex_в}}$, $\mathrm{Ex_в} < 1{,}5\mathrm{As_в}^2$.

С использованием вышеописанного подхода были получены выражения (7) для плотности *β*-распределения 1-го рода, соответствующие условию (6):

- применительно к выборке *X* из *N*=52 измерений загрязнений почвы нефтепродуктами, характеризующейся параметрами $\mathrm{Mx_в}$=2,679, $\mathrm{Kv_в}$=0,208, $\mathrm{As_в}$=0,135, $\mathrm{Ex_в}$=1,019, была построена 6-разрядная гистограмма (рис.2-а) и найдено выражение [7]:

$$\varphi_1(x) = 0{,}549(x-1{,}6)^{0{,}264}(3{,}7-x)^{0{,}491};$$

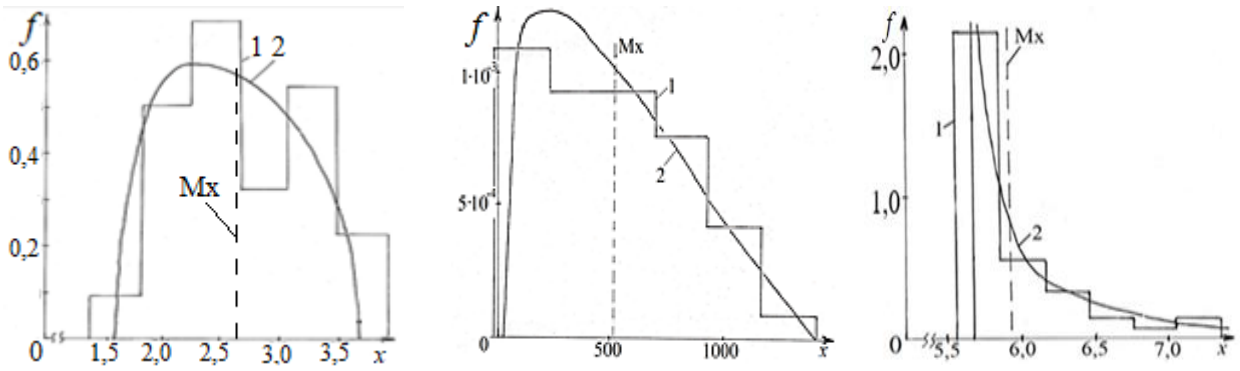
- по полувековым данным о среднегодовых расходах воды в одной из рек [10] была сформирована выборка *X* (*N*=50), характеризующаяся величинами $\mathrm{Mx_в}$=515, $\mathrm{Kv_в}$=0,613, $\mathrm{As_в}$=0,516, $\mathrm{Ex_в}$= -0,588, представленная в виде гистограммы (рис.2-б) и найдено выражение [8]:

$$\varphi_1(x) = 4{,}707\cdot 10^{-8}(x-34{,}41)^{0{,}190}(1442{,}39-x)^{1{,}293};$$

- для данных о многолетних наблюдениях за сейсмической активностью [11] была сформирована выборка *X* из *N*=53 значений энергетических классов сейсмических событий, характеризующаяся величинами $\mathrm{Mx_в}$=5,921, $\mathrm{Kv_в}$=0,0645, $\mathrm{As_в}$=1,928, $\mathrm{Ex_в}$=3,036, построена гистограмма (рис.2-в) и получено выражение [9]:

$$\varphi_1(x) = 0{,}2132\frac{(7{,}471-x)^{0{,}3491}}{(x-5{,}680)^{0{,}7906}}$$

Как видно из рис.2, полученные выражения *φ*(*x*) достаточно хорошо согласуются с исходными гистограммами выборок *X*.



а б в

Рис.2. Примеры аппроксимации гистограмм (1) выборок СВ плотностями β-распределения 1-го рода (2) по данным [7-9] (параметр f обусловливает равенство единице площадей под кривой плотности и высотой разрядов гистограммы)

2.Практический интерес представляет и *β*-распределение 2-го рода, имеющего плотность [5, 6]:

$$\varphi_2(x)=\frac{\Gamma(m+n)}{\Gamma(m)\Gamma(n)}\cdot\frac{|c|}{d}\cdot\frac{\left(\frac{x}{d}\right)^{cm-1}}{\left[1+\left(\frac{x}{d}\right)^{c}\right]^{m+n}},x>0 \qquad (11)$$

(*m*, *n*, *c*, *d* – параметры закона, *m* и *n* отличаются от таких параметров в *β*-распределении 1-го рода). Матожидание Mx_2, коэффициенты вариации Kv_2, асимметрии As_2 и эксцесса Ex_2 имеют соответственно вид:

$$\begin{cases}\mathrm{Mx}_2=d\frac{\Gamma(m+c^{-1})\Gamma(n-c^{-1})}{\Gamma(m)\Gamma(n)};\\ \mathrm{Kv}_2=\sqrt{\frac{\Gamma(m+2c^{-1})\Gamma(n-2c^{-1})}{\Gamma(m+c^{-1})\Gamma(n-c^{-1})}-1};\\ \mathrm{As}_2=2\frac{2m+n-1}{n-3}\sqrt{\frac{n-2}{m(m+n-1)}},n>3;\\ \mathrm{Ex}_2=6\frac{(n-1)^2(n-2)+m(m+n-1)(5n-11)}{m(m+n-1)(n-3)(n-4)},n>4.\end{cases} \qquad (12)$$

Мода *β*-распределения 2-го рода имеет вид:

$$\mathrm{Mo}_2=d\left(\frac{cm-1}{cn+1}\right)^{1/c}. \qquad (13)$$

Как и в предыдущем случае, интерес представляет решение обратной задачи (синтез): найти параметры *c*, *d*, *m* и *n* по известным величинам $Mx_в$, $Kv_в$, $As_в$ и $Ex_в$ выборки СВ. Для этого могут использоваться выражения:

$$m=\frac{W+2}{2}\left[\frac{\mathrm{As}_в W}{\sqrt{\mathrm{As}_в^2W^2-16(W+1)}}-1\right], \qquad (14)$$

$$n=3+W, \qquad (15)$$

где $W=(2\mathrm{Ex}_в+12)(2\mathrm{Ex}_в-3\mathrm{As}_в^2)^{-1}$ – комплексный параметр (очевидно: $\mathrm{Ex}_в>1{,}5\mathrm{As}_в^2$).

Величины *c* и *d* могут быть найдены из численного решения системы трансцендентных уравнений:

$$\begin{cases}\mathrm{Mx}_в=d\frac{\Gamma(m+c^{-1})\Gamma(n-c^{-1})}{\Gamma(m)\Gamma(n)},\\ \mathrm{Kv}_в=\sqrt{\frac{\Gamma(m+2c^{-1})\Gamma(n-2c^{-1})}{\Gamma(m+c^{-1})\Gamma(n-c^{-1})}-1}.\end{cases} \qquad (16)$$

Нахождение величин *c* и *d* может осуществляться следующим образом. Из 2-го уравнения (16), приведенного к виду

$$\mathrm{Kv}_в^2+1=\frac{\Gamma(m+2c^{-1})\Gamma(n-2c^{-1})}{\Gamma(m+c^{-1})\Gamma(n-c^{-1})}, \qquad (17)$$

определяется параметр *c*, после чего из 1-го уравнения (16) находится параметр *d*:

$$d=\mathrm{Mx}_в\frac{\Gamma(m)\Gamma(n)}{\Gamma(m+c^{-1})\Gamma(n-c^{-1})}. \qquad (18)$$

На практике распределение β^{II} не нашло такого широкого распространения, как распределение β^{I}, что обусловлено следующими обстоятельствами:

- распределение β^{II} применимо только для положительных СВ (т.е. *x*>0);

- область определения β^{II} на диаграмме {As, Ex} (рис.1) к настоящему времени строго не установлена (т.е. в отличие от β^{I}, далеко на все выборки СВ *X* могут быть описаны *β*-распределением 2-го рода, даже когда $\mathrm{Ex}_в\neq 1{,}5\mathrm{As}_в^2$, с чем автор и столкнулся);

- требуется применение численных методов для нахождения параметра *c* из выражения (17), причём может иметь место многовариантность решения, либо приемлемое значение *c* вообще не существует, как например, для величин $Mx_в$=515, $Kv_в$=0,613, $As_в$=0,516, $Ex_в$= -0,588 из ранее приведённого примера;

- необходимо с высокой точностью находить значения *γ*-функции Γ(*z*), причём и для отрицательных и нецелых значений *z*. Всё это значительно усложняет задачу синтеза β^{II}, т.е. нахождения параметров *m*, *n*, *c*, *d* по заданным значениям $Mx_в$, $Kv_в$, $As_в$ и $Ex_в$ выборки СВ. Решение этой задачи можно рассмотреть на тестовом примере, когда $Mx_в$=1,5, $Kv_в$=0,74536, $As_в$=1,61, $Ex_в$=4,08 (на диаграмме на рис.1 обозначен жирной точкой). Нужно заметить, что этим данным соответствует распределение β^{I} с плотностью

$$\varphi_1(x)=6{,}7752\cdot10^{-91}(x-0{,}17043)^{0{,}35424}(53{,}71775-x)^{52{,}1868}. \qquad (19)$$

Выражению (19) соответствует пунктирная кривая 3 на рис.3.

Для плотности распределения β^{II} получены сразу два выражения (соответственно при *c* = -1,7466, *d*=0,1537 и *c* = 1,026624, *d*=41,95 ввиду многовариантности решения, для обоих выражений *m*=1,7956, *n*=55,50):

$$\varphi_2(x)=\begin{cases}36{,}114\cdot\frac{\left(\frac{x}{41{,}95}\right)^{0{,}8434}}{\left[1+\left(\frac{x}{41{,}95}\right)^{1{,}026624}\right]^{57{,}29559}},\\ 16769{,}4\cdot\frac{\left(\frac{0{,}1537}{x}\right)^{4{,}1362}}{\left[1+\left(\frac{0{,}1537}{x}\right)^{1{,}7466}\right]^{57{,}29559}}\end{cases} \qquad (20)$$

Первому выражению (20) соответствует кривая 1 на рис.3, второму – кривая 2. Как видно из рис.3, плотности у распределений β^{I} и β^{II} заметны различия, но все они удовлетворяют условию (6) и могут адекватно описать выборку СВ характеризующуюся значениями $Mx_в$=1,5, $Kv_в$=0,74536, $As_в$=1,61, $Ex_в$=4,08.

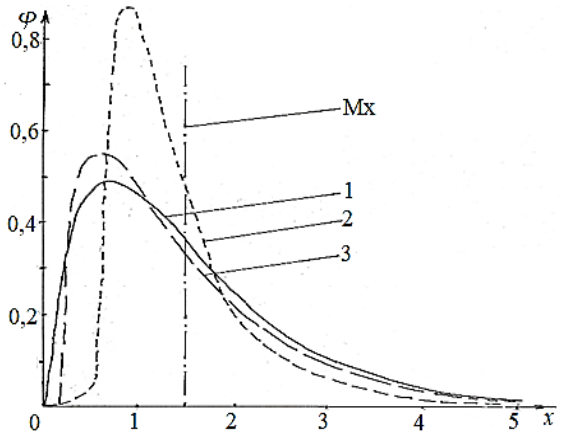


Рис.3. Плотности β-распределения, соответствующие тестовому примеру, когда $Mx_в$=1,5, $Kv_в$=0,74536, $As_в$=1,61 и $Ex_в$=4,08

Генерирование потоков случайных величин

Одной из важных задач, связанных с распределениями СВ, является генерирование потоков чисел, соответствующих тому или иному закону распределения и могущих применяться, например, при имитационном моделировании процессов функционирования объектов. Известное решение данной задачи предполагает нахождение обратной величины от функции распределения $F(x)=\int_{-\infty}^{x}\varphi(t)dt$ (т.е. $F^{-1}(x)$), что может представлять значительную трудность. Например, для *β*-распределения $F(x)=I_x(m, n)$ – отношение неполной *β*-функции [5], найти $F^{-1}(x)$ для которой аналитически невозможно.

В некоторых случаях может потребоваться генерирование СВ, когда только известны величины Mx, Kv, As и Ex или начальные моменты {*α*} (3), а закон распределения ни виде плотности *φ*(*x*), ни в виде функции *F*(*x*) не определён.

В этих случаях может быть предложено использование *L*-разрядной гистограммы $G(\Delta, p_1,..,p_L)$ с «шагом» *Δ* и вероятностями {*p*} разрядов (очевидно: $p_1+..+p_L=1$). Такая гистограмма может быть получена из решения системы нелинейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases}\alpha_0=\sum_{i=1}^{r}p_i=1;\\ \alpha_1=\Delta\frac{p_1+3p_2+5p_3+7p_4+9p_5+11p_6+13p_7+\cdots}{2};\\ \alpha_2=\Delta^2\frac{p_1+7p_2+19p_3+37p_4+61p_5+91p_6+127p_7+\cdots}{3};\\ \alpha_3=\Delta^3\frac{p_1+15p_2+65p_3+175p_4+369p_5+671p_6+1105p_7+\cdots}{4};\\ \alpha_4=\Delta^4\frac{p_1+31p_2+211p_3+781p_4+2101p_5+4651p_6+9031p_7+\cdots}{5}\end{cases} \quad (21)$$

или в компактном виде:

$$\alpha_j=\frac{\Delta^j}{j+1}\sum_{i=1}^{L}p_i\left[i^{j+1}-(i-1)^{j+1}\right], j=0,\ldots,4. \quad (22)$$

Решение систем уравнений (21), (22) при условии, что величины {p_i} неотрицательные, возможно только в численном виде, причём может быть получено несколько вариантов гистограмм $G(\Delta, p_1,..,p_L)$.

В частности, для тестового примера (параметрам Mx=1,5, Kv=0,74536, As=1,61 и Ex=4,08 соответствуют начальные моменты α_1=1,5; α_2=3,5; α_3=11,25; α_4=46,503) получены две гистограммы, представленные на рис.4-а: семиразрядная (*L*=7) гистограмма (1 на рис.4-а) *Δ*=0,84565, p_1=0,2925, p_2=0,3373, p_3=0,3061, $p_4=p_5=p_6$=0,01, p_7=0,0341; пятиразрядная (*L*=5) гистограммы (2 на рис.4-а) *Δ*=1,0195, p_1=0,448, p_2=0,258, p_3=0,158, p_4=0,097, p_5=0,038.

С использованием таких гистограмм возможно получение потоков СВ с заданными параметрами Mx, Kv, As и Ex (рис.4-б) и последующим формированием *N*-мерного вектора СВ с такими же параметрами. Полученный вектор *X* может использоваться при имитационном моделировании транспортных процессов, в т.ч. перевозок грузов и пассажиров морскими и речными судами.

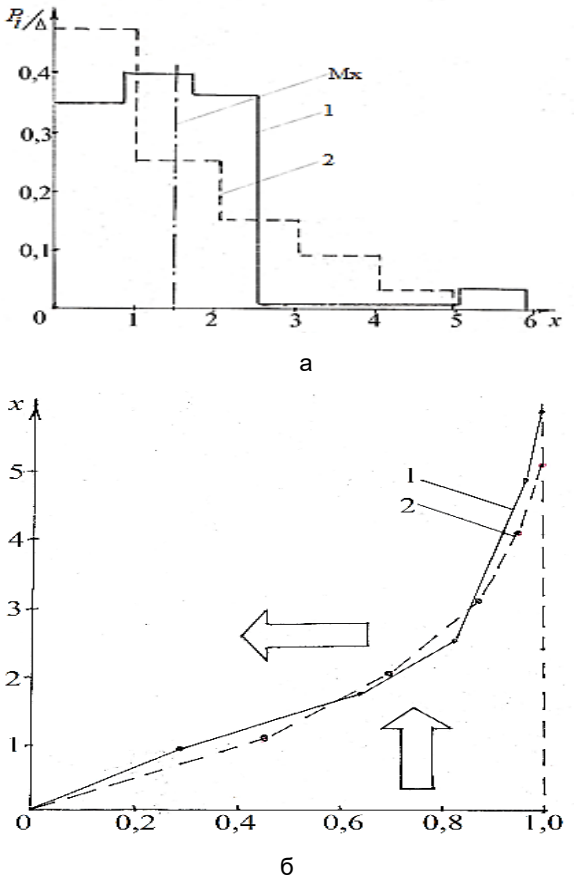


Рис.4. Семи- и пятиразрядная гистограммы с параметрами Mx=1,5, Kv=0,74536, As=1,61, Ex=4,08 (а) и порядок генерирования потоков СВ по соответствующим кумулятам (горизонтальная ось) гистограмм (б)

Заключение

Таким образом, в работе рассмотрены вопросы соотнесения выборок СВ известным законам распределения с использованием чашевидной диаграммы «асимметрия-эксцесс» {As, Ex}. Для законов распределения СВ предложено использовать обозначения двумя латинскими буквами (по аналогии с обозначениями химических элементов), а иногда – греческими буквами.

Показано, что достаточно эффективным при этом является *β*-распределения 1-го и 2-го рода (занимает наибольшую площадь в чашевидной диаграмме {As, Ex}), представлены аналитические выражения для нахождения параметров этого распределения по заданным характеристикам выборки СВ: матожиданию и коэффициентам вариации, асимметрии и эксцесса. С учётом опыта идентификации выборок СВ показано, что *β*-

распределение 1-го рода является наиболее приемлемым. Приведены соответствующие примеры.

В работе рассмотрена и обратная задача – генерирование потока СВ с формированием *N*-мерного вектора *X*, имеющего заданные значения матожидания и коэффициентов вариации, асимметрии и эксцесса, для чего создаётся специальная гистограмма с такими же характеристиками. Изложен метод построения такой гистограммы. Сгенерированный *N*-мерный вектор СВ может использоваться при моделировании транспортных процессов и систем [1-3], в частности, для оптимизации перевозок грузов и пассажиров морскими и речными судами.

В перспективе рассматривается возможность применения рассмотренного подхода к анализу данных, когда в векторе *X* присутствуют как СВ, так и неслучайные (периодически регистрируемые) величины.

Литература

1. Селиверстов С.А., Селиверстов Ю.А., Лукомская О.Ю., Асаул М.А. Разработка имитационной модели управления шлюзами Волго-Донского канала // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 3. С. 105–114.
2. Кузнецов А.Л., Изотов О.А., Семенов А.Д., Смоленцев С.В. Методы мягких вычислений для генерации неоднородных потоков событий в моделировании транспортных систем // Морские интеллектуальные технологии. 2018, №4(42). С.186-190.
3. Тянь Х., Сафиуллин Р.Н., Сафиуллин Р.Р. Моделирование перевозочного процесса (в контексте доставки опасных грузов) // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2-1(56). С. 162-167.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Учеб. пособие для ВУЗов. – Изд. 5-е стер. М.: Высш. шк., 1998. – 576 с.
5. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. СПб.: Наука, 2001. – 295 с.
6. Таранцев А.А. Случайные величины и работа с ними. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – СПб.: ИД «Петрополис», 2011. – 160 с.
7. Малыгин И.Г. Обоснование метода нормирования уровня нефтяного загрязнения почв на территории объектов добычи и транспортировки нефти в Арктической зоне / А.А. Макоско, И.Г. Малыгин, А.А. Таранцев, Л.А. Королёва, Р.Г. Зайкин // Арктика, экология и экономика, №4, т.4, 2024, с.585-595.
8. Малыгин И.Г., Таранцев А.А., Васьков В.Т., Шупнёв Д.С. Определение закономерностей в статистических данных о параметрах природных ЧС // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 3 (75). С. 30–39.
9. Таранцев А.А., Матвеев А.В., Шупнёв Д.С., Шупнёв И.Д. О задаче подбора закона распределения для выборок случайных величин // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России». 2026. № 1. С. 22–29.
10. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. К.: «Техніка», 1975. – 312 с.
11. Завьялов Д.А. Среднесрочный прогноз землетрясений. Основы. Методика. Реализация. М.: Наука, 2006. – 254 с.

References

1. Seliverstov S.A., Seliverstov Yu.A., Lukomskaya O.Yu., Asaul M.A. Development of a simulation model for controlling the locks of the Volga-Don Canal//Marine Intelligent Technologies. 2017. № 3. P.105-114.
2. Kuznetsov A.L., Izotov O.A., Semenov A.D., Smolentsev S.V. Methods of soft calculations for generating inhomogeneous event flows in modeling transport systems//Marine intelligent technologies. 2018, №4(42). P.186-190.
3. Tien H., Safiullin R.N., Safiullin R.R. Modeling of the transportation process (in the context of the delivery of dangerous goods) // Marine intelligent technologies. 2022. № 2-1(56). P. 162-167.
4. Wentzel E.S. Probability theory. Study guide for universities. - Ed. 5th err. M.: High. shk., 1998. - 576 p.
5. Vadzinsky R.N. Handbook on probability distributions. St. Petersburg: Science, 2001. - 295 p.
6. Tarantsev A.A. Random variables and work with them. - Ed. 2nd, revised. and add. - St. Petersburg: Publishing House "Petropolis," 2011. - 160 p.
7. Malygin I.G. Justification of the Method for Normalizing the Level of Oil Pollution of Soils on the Territory of Oil Production and Transportation Facilities in the Arctic Zone/A.A. Makosko, I.G. Malygin, A.A. Tarantsev, L.A. Koroleva, R.G. Zaykin//Arctic, Ecology and Economy, No. 4, vol. 4, 2024, P. 585-595.
8. Malygin I.G., Tarantsev A.A., Vaskov V.T., Shupnev D.S. Determination of patterns in statistical data on the parameters of natural emergencies//Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 3 (75). P. 30-39.
9. Tarantsev A.A., Matveev A.V., Shupnev D.S., Shupnev I.D. On the task of selecting the distribution law for random samples//Scientific and analytical journal "Bulletin of St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia." 2026. № 1. P. 22-29.
10. Ivakhnenko A.G. Long-term forecasting and management of complex systems. K.: Technika, 1975. - 312 p.
11. Zavyalov D.A. Medium-term earthquake forecast. Fundamentals. Methodology. Implementation. M.: Science, 2006. - 254 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 О Б АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Таранцев Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН (199178, Санкт-Петербург, 12-я Линия В.О., д.13), e-mail: t__54@mail.ru

Alexander A. Tarantsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Laboratory of the N.S. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences (199178, St. Petersburg, 12th Line V.O., 13), e-mail: t__54@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 06.07.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.07.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 22.07.2026.

Обзорная статья
УДК 531.391.1:532.5.011
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.065

Развитие методов сверхразрешения в антенных решетках

Семенов Н.Н.[1] semenov@smtu.ru**, Клюбина К.А.**[1] kkluybina@yahoo.com
[1]Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Данная статья представляет собой комплексный аналитический обзор эволюции методов сверхразрешения (Super-Resolution, SR) применительно к антенным решеткам. Основная сфера рассмотрения — радиолокационные, гидроакустические и коммуникационные системы, где повышение углового разрешения критически важно. Детально прослеживается развитие ключевых алгоритмических парадигм: от классических высокоточных методов, таких как MUSIC (MUltiple SIgnal Classification) и ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques), до подходов, основанных на принципе максимального правдоподобия (ML). Анализируются не только теоретические основы этих методов, но и практические аспекты их реализации. Статья систематизирует фундаментальные ограничения традиционных алгоритмов сверхразрешения: чувствительность к коррелированным сигналам и когерентным помехам, деградацию точности в условиях низкого отношения сигнал/шум (SNR), а также высокую вычислительную сложность, затрудняющую реализацию в реальном времени. Особый акцент делается на перспективных направлениях, способных преодолеть эти барьеры. В заключительной части обсуждается интеграция методов искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) в данную предметную область. Рассматривается потенциал нейросетевых моделей для создания более робастных, адаптивных и менее ресурсоемких алгоритмов оценки направления прихода сигналов, что открывает новые горизонты для развития информационно-управляющих систем морского базирования.
Ключевые слова: сверхразрешение, антенные решетки, MUSIC, ESPRIT, максимальное правдоподобие, гидролокация, угловое разрешение, обработка сигналов, машинное обучение.
Для цитирования: Семенов Н.Н., Клюбина К.А. Развитие методов сверхразрешения в антенных решетках, Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 351—357. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.065

Reviewl article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.065

Development of super-resolution methods in antenna arrays

Nikolai N. Semenov[1] semenof@smtu.ru**, Ksenia A. Klubina**[1] kkluybina@yahoo.com
[1]St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. This article presents a comprehensive analytical review of the evolution of super-resolution (SR) methods as applied to antenna arrays. The primary focus is on radar, hydroacoustic, and communication systems, where enhancing angular resolution is critically important. The development of key algorithmic paradigms is traced in detail: from classical high-precision methods such as MUSIC (MUltiple SIgnal Classification) and ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) to approaches based on the principle of maximum likelihood (ML). The analysis covers not only the theoretical foundations of these methods but also the practical aspects of their implementation. The article systematizes the fundamental limitations of traditional super-resolution algorithms: sensitivity to correlated signals and coherent interference, degradation of accuracy under low signal-to-noise ratio (SNR) conditions, as well as high computational complexity, which hampers real-time implementation. Special emphasis is placed on promising directions capable of overcoming these barriers. The concluding part discusses the integration of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) methods into this subject area. The potential of neural network models for creating more robust, adaptive, and less resource-intensive algorithms for estimating the direction of signal arrival is considered, which opens new horizons for the development of maritime-based information and control systems.
Keywords: super-resolution, antenna arrays, MUSIC, ESPRIT, maximum likelihood, hydroacoustic, angular resolution, signal processing, machine learning.
For citation: Niklolai N. Semenov, Ksenia A. Klubina Development of super-resolution methods in antenna arrays, Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 351—357. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.065

Введение

Методы сверхразрешения по углу — это набор алгоритмов и техник, которые позволяют повысить разрешающую способность антенных систем по углу. Для разрешения нескольких источников сигнала и помех необходимо использовать правило Крамера-Рао, гласящее, что оценки параметров случайных сигналов являются случайными величинами, а потенциальный предел разрешающей способности антенны зависит от отношения сигнал/помеха, и с ростом этого отношения разрешающая способность растет, и также, что для разрешения N источников сигнала по направлению прихода сигнала необходимо не менее N приемных элементов антенны [1].

© Семенов Н.Н. Клюбина К.А. 2026

Классификация методов определения пеленга

Наиболее известные алгоритмы, структурированные по своим параметрам, показаны на рис. 1.



Рис. 1. Распределение алгоритмов пеленгации по группам

Пеленгаторы делятся на параметрические и непараметрические. Причем непараметрические основаны на энергетических свойствах сигнала, таких как энергия или корреляция. Непараметрические пеленгаторы низкого разрешения – это классическое формирование фазированного луча характеристики направленности (метод периодограмм) и взаимная корреляция сигнала между приемными антеннами (метод коррелограмм). Данные методы известны давно, хорошо известны, надежны, но имеют низкую разрешающую способность, поэтому к методам сверхразрешения не относятся. Будем использовать их как эталон для сравнения с другими методами и алгоритмами.

Все остальные методы относятся к методам сверхразрешения, так как при высоком отношении сигнал-помеха могут давать разрешение в десятки раз лучше, чем методы периодограмм или коррелограмм. Первым и наиболее популярным методом сверхразрешения является **метод Кейпона** [1], который построен как оптимальный математический пространственый фильтр, основанный на знании ковариационной матрице сигналов и помех на элементах антенны. Оценка ковариационной матрицы:

$$\mathbf{R} = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^{H}(t), \qquad (1)$$

где **x**(*t*) – входной сигнал, *H* – эрмитово сопряжение, *N* – число отсчетов.

Тогда для построения оптимального пространственного фильтра необходимо найти такой весовой вектор **w**(Θ), при котором сигнал с направления Θ проходит без искажений, но при этом достигается минимум функции $\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^{H}\mathbf{R}\mathbf{w}$.

Решением задачи является оптимальный весовой вектор:

$$\mathbf{w}(\Theta) = \frac{\mathbf{R}^{-1}\boldsymbol{a}(\Theta)}{\boldsymbol{a}^{H}(\Theta)\mathbf{R}^{-1}\boldsymbol{a}(\Theta)}, \qquad (2)$$

где ***a***(Θ) – направляющий вектор для направления Θ. Умножением входного сигнала **x**(*t*) на этот вектор можно получить максимальное отношение сигнал/помеха.

Если необходимо не фильтровать сигнал, а определять только угловые параметры источников сигнала, можно вычислить пеленгационный рельеф:

$$P_{Кейпон}(\Theta) = \frac{1}{\boldsymbol{a}^{H}(\Theta)\mathbf{R}^{-1}\boldsymbol{a}(\Theta)}. \qquad (3)$$

Данный метод также называется «методом прямого обращения матрицы» [1, 2, 3], он хорошо работает как при высоких отношениях сигнал/помеха, так и при низких, опускаясь до параметров разрешения, не хуже метода периодограмм. Кроме того, он не требует априорного знания количества источников сигналов и помех, но его точность существенно зависит от точности оценки матрицы корреляции, что ограничивает его использование для нестационарных сигналов и помех.

Преимущества: хорошая устойчивость к помехам.

Недостатки: требует высокой вычислительной сложности и точного знания ковариационной матрицы.

Метод Барготти-Лагунаса (Борджотти-Лагунаса) [4] является модификацией метода Кейпона с целью сделать его более устойчивым к быстро меняющимся сигналам, но при этом теряется потенциальная точность его работы.

$$P_{Барготти-Лагунаса}(\Theta) = \boldsymbol{a}^{H}(\Theta)\mathbf{R}\boldsymbol{a}(\Theta). \qquad (4)$$

Главное преимущество алгоритма – вычислительная простота. В отличие от многих методов, ему не нужно рассчитывать и обрабатывать громоздкие обратные матрицы (к примеру, для антенны в 70 элементов матрица имеет размер 70x70, что сложно для вычислений). За эту простоту приходится платить: качество его работы уступает более требовательному, но точному алгоритму Кейпона, что показано в исследовании [6].

Преимущества: низкая вычислительная сложность.

Недостатки: низкая устойчивость к помехам.

Метод CLEAN – итеративный алгоритм [5], который последовательно выделяет и удаляет компоненты сигналов из данных. Используется для улучшения разрешения в условиях сильных помех.

Проблема разрешения близко стоящих источников заключается в том, что измеренные данные – это свертка истинного распределения источников с функцией рассеяния точки (PSF, Point Spread Function), которая зависит от геометрии антенной решетки. PSF размывает картину, и задача состоит в том, чтобы восстановить исходное распределение. Для этого берется «грязная карта» (dirty map) – это исходное распределение сигнала, полученное напрямую из измерений, «грязный луч» – это PSF, вычисленная для данной конфигурации антенной решетки, на «грязной карте» находится точка с максимальной интенсивностью и производится деконволюция сигнала для восстановления истинного положения точки («чистая модель»). После этого из сигнала вычитается найденный источник, и процедура повторяется до достижения заданного уровня оставшегося сигнала.

Преимущества: простота реализации, высокая точность для точечных источников, устойчивость к шуму и неточной настройке параметров.

Недостатки: может быть чувствителен к ошибкам моделирования.

Метод максимальной энтропии (Maximum Entropy Method, MEM) – это более продвинутый подход к обработке сигналов в антенных решетках, который используется для задач сверхразрешения [1, 7, 8]. Он отличается от CLEAN тем, что основан на информационно-теоретическом принципе, а не на итеративной деконволюции.

Метод максимальной энтропии (MEM) находит распределение, которое, с одной стороны, идеально объясняет наблюдаемые данные, а с другой — является наиболее простым и не содержит избыточной информации, что соответствует принципу максимальной неопределённости (энтропии).

Энтропия здесь — мера "неопределённости" или "равномерности" распределения. Чем выше энтропия, тем меньше искусственных предположений о структуре сигнала, что делает метод устойчивым к шуму и переобучению.

MEM ищет такой пеленгационный рельеф P(Θ), который максимизирует энтропию, определяемую как:

$$H = -\int P(\Theta)\ln P(\Theta)\mathrm{d}\Theta \qquad (5)$$

при условии, что восстановленные данные соответствуют измерениям (например, автокорреляционной функции или спектру мощности). В результате использования метода множителей Лагранжа для оптимизации получаем выражение для пеленгационного рельефа:

$$P_{\mathrm{MEM}}(\Theta) = \frac{1}{\sum_k \lambda_k e^{-jk\Theta}}, \qquad (6)$$

где λ_k – коэффициенты, которые подбираются так, чтобы модель соответствовала измеренным данным. Этот процесс сводится к решению нелинейной системы уравнений и требует численных методов.

Преимущества: высокая точность в условиях низкого отношения сигнал/шум.

Недостатки: высокая вычислительная сложность, особенно для большого числа источников сигналов.

Метод максимального правдоподобия (Maximum Likelihood, ML) основан на поиске параметров сигналов, которые максимизируют функцию правдоподобия [3, 10]. ML предполагает, что измеренные данные (сигналы, принятые антенной решёткой) можно описать математической моделью с учутом шума. Задача — найти параметры этой модели (например, углы прихода источников), которые максимизируют вероятность наблюдаемых данных. Это делает метод строгим и теоретически оптимальным при правильных предположениях о шуме и сигнале.

Как и в методе Кейпона, основой обработки служит ковариационная матрица. В рамках стандартного предположения о гауссовом шуме данные x(t) описываются многомерным нормальным распределением. Тогда выражение для логарифма правдоподобия выборки из T отсчётов выглядит так:

$$L(\boldsymbol{\Theta},\boldsymbol{S},\sigma^2) = -\frac{T}{2}\ln|\boldsymbol{R}| - \frac{1}{2}\sum_{y=1}^{T}\boldsymbol{x}^H(t)\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{x}(t), \qquad (7)$$

где $|\boldsymbol{R}|$ - определитель матрицы $\boldsymbol{R}$, $\boldsymbol{S}$ – матрица амплитуд источников, $\boldsymbol{\Theta}$ – матрица углов прихода сигнала, σ^2 – дисперсия шума на входе антенны.

ML ищет такие $\boldsymbol{\Theta}$, $\boldsymbol{S}$, σ^2, которые максимизируют L.

Преимущества: высокая точность в условиях низкого отношения сигнал/шум, теоретическая оптимальность.

Недостатки: высокая вычислительная сложность, особенно для большого числа источников сигналов.

Метод наименьших квадратов (Least Squares, LS) – это классический подход к обработке сигналов, который также применяется в задачах сверхразрешения в антенных решётках [2, 3, 8]. Он основывается на минимизации квадратичной ошибки между измеренными данными и моделью сигнала. Хотя LS сам по себе не всегда обеспечивает сверхразрешение в строгом смысле (как MUSIC или ML), его модификации (например, Weighted LS или Total LS) могут значительно улучшить разрешающую способность. LS стремится найти параметры модели сигнала (например, амплитуды или углы прихода источников), которые минимизируют сумму квадратов отклонений между измеренными данными и предсказанными значениями. В антенных решётках это обычно сводится к оценке сигнала или его параметров на основе данных с датчиков. Цель метода – минимизировать ошибку:

$$J(\Theta,S) = \left\| X - A(\Theta)S \right\|_F^2, \qquad (8)$$

где X – выборка входного сигнала, $A(\Theta)$ – амплитуды источников, S – сигналы от каждого моделируемого источника, $\left\|...\right\|_F$ – норма Фробениуса.

Метод MUSIC (Multiple Signal Classification) - это один из самых популярных алгоритмов сверхразрешения [1, 2, 3, 4]. Данный метод основан на спектральном анализе и разделении пространства сигналов на подпространства: шумовое и сигнальное. MUSIC использует собственные векторы ковариационной матрицы принятых сигналов для построения псевдоспектра, пики которого соответствуют направлениям прихода сигналов. Ключевое свойство – векторы отклика решетки (steering vectors) для истинных углов прихода сигналов ортогональны шумовому подпространству.

MUSIC использует это свойство для точной локализации источников.

Метод основан на обработке ковариационной матрицы, которую на практике заменяют на выборочную матрицу:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^{H}(t), \quad (9)$$

которая раскладывается на собственные значения и векторы: $\hat{\mathbf{R}} = E\Lambda E^{H}$. При этом собственные значения делятся на сигнальное подпространство (большие значения) и шумовое подпространство (маленькие значения). Благодаря этому появляется возможность разделить матрицу корреляции на несколько матриц, обнуляя слабые собственные значения и оставляя только пары больших значений (отдельные источники сигнала). Пеленгационный рельеф рассчитывается следующим образом:

$$P_{\text{MISIC}}(\Theta) = \frac{1}{\boldsymbol{a}^{H}(\Theta)E_N E_N^{H}\boldsymbol{a}(\Theta)}. \quad (10)$$

Преимущества: высокая точность, возможность работы с несколькими источниками сигналов.

Недостатки: требует точного знания числа источников сигналов и высокой вычислительной мощности.

Метод ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational In-variance Techniques) основан на использовании вращательной инвариантности подпространств сигналов [1, 3]. ESPRIT не требует поиска пиков в спектре, что упрощает вычисления по сравнению с MUSIC.

Преимущества: высокая точность, меньшая вычислительная сложность.

Недостатки: требует специальной геометрии антенной решетки (например, двух идентичных подрешеток).

Результаты моделирования алгоритмов сверхразрешения по углу прихода сигнала

Для сравнения различных алгоритмов определения направления прихода сигнала было проведено численное исследование на сигналах, близких по структуре к натурным. Для этого моделировалось распространение сигналов от нескольких близко расположенных источников до антенной решётки гидролокатора. Сигнал для каждого элемента рассчитывался с индивидуальной временной задержкой, определяемой геометрией антенны (координатами элемента) и направлением на источник. Частота сигнала в качестве примера была выбрана 25 кГц, что не позволяет классическим методам получить узкую характеристику направленности.

Классические методы, такие как периодограммы и коррелограммы, формируют оценку спектральной плотности мощности (СПМ) через прямое преобразование Фурье. Их разрешающая способность ограничена длиной апертуры и не позволяет разделить цели, угловое расстояние между которыми меньше ширины главного лепестка. В отличие от них, методы сверхразрешения:

- Параметрические подходы (ML, MEM) – строят модель сигнала, что повышает точность оценки при известной статистике помех.
- Адаптивные алгоритмы (Capon) – динамически подстраиваются под структуру помех.
- Подпространственные методы (MUSIC, ESPRIT) – используют декомпозицию сигнала и шума, что обеспечивает высокую точность при малом числе выборок.

При высоком отношении сигнал-помеха (20 дБ и более) методы сверхразрешения также демонстрируют превосходство над классическими. Например, ширина главного лепестка для MUSIC и ESPRIT может быть в 10–30 раз уже, чем у периодограмм, что подтверждается результатами моделирования (рис. 2). На рисунке показано, что при SNR = 20 дБ MUSIC и ESPRIT четко разделяют две цели с угловым расстоянием в несколько градусов, в то время как периодограмма Бартлетта отображает их как единый широкий пик.

Эксперименты проводились для гидроакустической антенны с 32 элементами. В условиях SNR = 20 дБ методы сверхразрешения показали:

- Точность оценки угла: ±0.1° для MUSIC/ESPRIT против ±2° для периодограмм.
- Разрешающая способность: разделение целей на расстоянии 1° (для MUSIC) против 15° (классические методы).

на источник. Частота сигнала в качестве примера была выбрана 25 кГц, что не позволяет классическим методам получить узкую характеристику направленности.

Классические методы, такие как периодограммы и коррелограммы, формируют оценку спектральной плотности мощности (СПМ) через прямое преобразование Фурье. Их разрешающая способность ограничена длиной апертуры и не позволяет разделить цели, угловое расстояние между которыми меньше ширины главного лепестка. В отличие от них, методы сверхразрешения:

- Параметрические подходы (ML, MEM) – строят модель сигнала, что повышает точность оценки при известной статистике помех.
- Адаптивные алгоритмы (Capon) – динамически подстраиваются под структуру помех.
- Подпространственные методы (MUSIC, ESPRIT) – используют декомпозицию сигнала и шума, что обеспечивает высокую точность при малом числе выборок.

При высоком отношении сигнал-помеха (20 дБ и более) методы сверхразрешения также демонстрируют превосходство над классическими. Например, ширина главного лепестка для MUSIC и ESPRIT может быть в 10–30 раз уже, чем у периодограмм, что подтверждается результатами моделирования (рис. 2). На рисунке показано, что при SNR = 20 дБ MUSIC и ESPRIT четко разделяют две цели с угловым расстоянием в несколько градусов, в то время как периодограмма Бартлетта отображает их как единый широкий пик.

Эксперименты проводились для гидроакустической антенны с 32 элементами. В условиях SNR = 20 дБ методы сверхразрешения показали:

- Точность оценки угла: ±0.1° для MUSIC/ESPRIT против ±2° для периодограмм.
- Разрешающая способность: разделение целей на расстоянии 1° (для MUSIC) против 15° (классические методы).

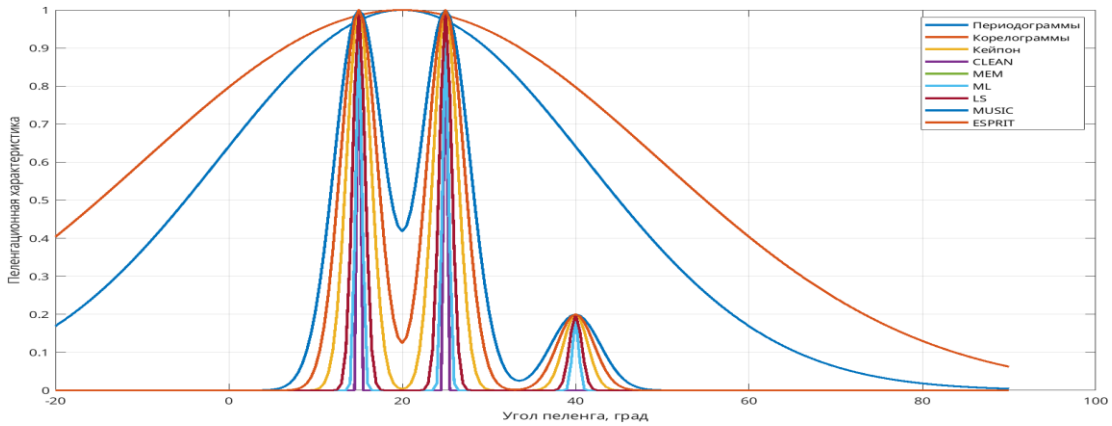


Рис. 2. Пример пеленгационной характеристики различных алгоритмов

Причем видно, что различные алгоритмы сверхразрешения с одной стороны все позволяют получить высокую разрешающую способность, но при этом результаты их работы могут отличаться по форме графика. Наилучшие результаты показывают алгоритмы MEM и ML (максимального правдоподобия и максимальной энтропии).

Быстродействие алгоритмов на одних и тех же данных показано в табл. 1.

Таблица 1

Варианты параметров расчета коэффициента потерь

Алгоритм	Точность, град.	Разрешающая способность, град.	Время выполнения, мс
Периодограмм	10	45.262	0.1
Корелограмм	12	53.748	0.06
Кейпон	1.504	2.378	12.3
CLEAN	1.037	1.963	9-16
Максимальной энтропии	0.6158	1.677	47.6
Максимального правдоподобия	0.5206	1.217	93.6
Минимальных квадратов	0.9723	2.091	73.2 мс
MUSIC	1.9460	3.162	23.6
ESPRIT	1.2749	2.879	27.8

По результатам моделирования (табл. 1) видно, что быстродействие алгоритма периодограмм (фазирование) оказывается в сотни раз выше, чем у таких «тяжелых» для вычислений алгоритмов, как метод максимальной энтропии, максимального правдоподобия или минимальных квадратов. Поэтому в системах, требующих максимального быстродействия, можно использовать алгоритм периодограмм. Но в системах, где требуется высокая разрешающая способность (например, в гидролокаторе подводного аппарата, чтобы различить рядом стоящие приборы помех и эхосигнал цели) требуются алгоритмы сверхразрешения.

Сравнение различных алгоритмов сверхразрешения по точности, вычислительной сложности то устойчивости к изменению параметров сигнала показано в табл. 2.

Таблица 2

Варианты параметров расчета коэффициента потерь

Метод	Категория	Разрешение	Точность	Вычислительная сложность	Устойчивость
Фазирование, корреляция	Обычные	Ограниченное	Низкая	Низкая	Высокая
ML	Параметрические	Высокое	Высокая	Высокая	Средняя
LS	Параметрические	Высокое	Средняя	Умеренная	Средняя
MEM	Непараметрические	Высокое	Высокая	Высокая	Высокая
MUSIC	Непараметрические	Высокое	Высокая	Умеренная	Высокая
ESPRIT	Непараметрические	Высокое	Высокая	Умеренная	Высокая
CLEAN	Непараметрические	Высокое	Зависит	Высокая	Высокая

В табл. 2 видно, что непараметрические методы имеют более высокую точность по сравнению с параметрическими методами и высокую устойчивость к изменению параметров сигналов, но

при этом и большую вычислительную сложность. Тем не менее, при современном уровне развития микропроцессоров оказывается возможным использование таких алгоритмов для обработки сигналов в реальном времени.

Заключение

Проведённый анализ позволяет сформулировать ряд ключевых выводов относительно эволюции, возможностей и применимости методов сверхразрешения в антенных решётках, в особенности для гидроакустических систем.

Существует фундаментальный компромисс между точностью, вычислительной сложностью и устойчивостью. Классические методы (формирование луча, корреляционный анализ) обеспечивают высокое быстродействие и надёжность, но их угловое разрешение жёстко ограничено физической апертурой антенны. Методы сверхразрешения преодолевают этот предел, однако расплатой за высокую точность (до 0.5°) и возможность разделять близко расположенные источники, как правило, становится значительный рост вычислительных затрат (в десятки и сотни раз) и повышенная чувствительность к точности априорных данных (числу источников, свойствам помех).

Выбор оптимального алгоритма определяется конкретной задачей и условиями эксплуатации. Результаты моделирования показывают, что:

1. Для систем, работающих в реальном времени с высоким отношением сигнал/шум (SNR), наиболее эффективны подпространственные методы MUSIC и ESPRIT, сочетающие высокое разрешение с умеренной вычислительной сложностью.
2. В сложных условиях с низким SNR и необходимостью максимальной точности предпочтение следует отдавать статистически оптимальным методам максимального правдоподобия (ML) и максимальной энтропии (MEM), несмотря на их высокую ресурсоёмкость.
3. Адаптивные методы, такие как метод Кейпона, обеспечивают хороший баланс между разрешающей способностью и устойчивостью к помехам, не требуя точного знания количества источников, но критически зависят от точности оценки ковариационной матрицы.
4. Итеративные (CLEAN) и регрессионные (LS) методы предлагают альтернативные подходы с разным соотношением точности, сложности и устойчивости к ошибкам моделирования.

Дальнейшее развитие лежит в плоскости гибридных и интеллектуальных подходов. Для преодоления присущих традиционным алгоритмам ограничений (чувствительность к когерентным помехам и высокая сложность) наиболее перспективным направлением является интеграция методов искусственного интеллекта и машинного обучения. Нейросетевые модели обладают потенциалом для создания:

- Адаптивных алгоритмов, способных работать в нестационарной и априорно неизвестной помеховой обстановке.
- Ресурсоэффективных решений, аппроксимирующих точность сложных методов (ML, MEM) с меньшими вычислительными затратами, что критически важно для систем морского базирования, работающих в реальном времени.

Таким образом, современный арсенал методов сверхразрешения предоставляет инженеру широкий спектр инструментов, выбор которых должен основываться на чётком понимании физических условий, требований к точности и доступных вычислительных ресурсов.

Литература

1. Van Trees H.L. Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory — Wiley, 2002.
2. Johnson D.H., Dudgeon D.E. Array Signal Processing: Concepts and Techniques — Prentice Hall, 1993.
3. Sarkar T.K., Pereira O. Using the Matrix Pencil Method to Esti-mate the Parameters of a Sum of Complex Exponentials — IEEE Anten-nas and Propagation Magazine, 1995.
4. Abraham D.A. Underwater Acoustic Signal Processing: Model-ing, Detection, and Estimation — Springer, 2019.
5. Yang Y., Li J., Stoica P. Sparse Methods for Direction-of-Arrival Estimation — Academic Press Library in Signal Processing, 2014.
6. International Conference on Underwater Acoustics (ICAUA):
7. Семенов Н.Н. Сравнение различных типов сигнала посылки для активного гидролокатора [Текст]. СПб, 9(41)/2008, «Политехника», стр. 23-28.
8. Семенов Н.Н. Структура и алгоритм бликового когерентного классификатора ПЛ и ИЦ [Текст]. – СПб, Гидроприбор, 2008.
9. Семенов Н.Н. Устройство обнаружения подводных объектов сложной формы по оценке меры случайности эхо-сигнала. Патент RUS 83344 от 27.05.2009.
10. Семенов Н.Н. Цифровое формирование направленности гидроакустической антенны во временной области. Фундаментальная и прикладная гидрофизика. СПб: Изд-во «СПб НЦ РАН». – 2011. – №4(1). – С. 32-47.

References

1. Van Trees H.L. Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory — Wiley, 2002.
2. Johnson D.H., Dudgeon D.E. Array Signal Processing: Concepts and Techniques — Prentice Hall, 1993.
3. Sarkar T.K., Pereira O. Using the Matrix Pencil Method to Esti-mate the Parameters of a Sum of Complex Exponentials — IEEE Anten-nas and Propagation Magazine, 1995.
4. Abraham D.A. Underwater Acoustic Signal Processing: Model-ing, Detection, and Estimation — Springer, 2019.
5. Yang Y., Li J., Stoica P. Sparse Methods for Direction-of-Arrival Estimation — Academic Press Library in Signal Processing, 2014.

6. International Conference on Underwater Acoustics (ICAUA):
7. Semenov N.N. Sravnenie razlichnyh tipov signala posylki dlya aktivnogo gidrolokatora [Tekst]. SPb, 9(41)/2008, «Politekhnika», str. 23-28
8. Semenov N.N. Struktura i algoritm blikovogo kogerentnogo klassifikatora PL i IC [Tekst]. – SPb, Gidropribor, 2008
9. Semenov N.N. Ustrojstvo obnaruzheniya podvodnyh ob"ektov slozhnoj formy po ocenke mery sluchajnosti ekho-signala. Patent RUS 83344 ot 27.05.2009.
10. Semenov N.N. Cifrovoe formirovanie napravlennosti gidroakusticheskoj antenny vo vremennoj oblasti. Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika. SPb: Izd-vo «SPb NC RAN». – 2011. – №4(1). – S. 32-47.

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

Семенов Николай Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры морских информационных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: semenov@smtu.ru

Nikolai N. Semenov, Ph.D. (Eng.), assistant professor of the Department of marine Iinformation systems and technologies, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: semenov@smtu.ru

Клюбина Ксения Александровна, кандидат физико-математических наук наук, доцент кафедры физики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kkluybina@yahoo.com

Ksenia A. Klubina, Ph.D. (Eng.), assistant professor of the Departament of physics, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kkluybina@yahoo.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 19.12.2025.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 25.12.2025.
Принята к публикации/accepted for publication 27.12.2025.

Научная статья
УДК 621.396.218:551.46
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.066

Верификация стохастической модели двухлучевого распространения радиоволн над морской поверхностью на радиорелейной-трассе 18 ГГц в Уссурийском заливе

Стаценко Л.Г.[1] statsenko.lg@vfu.ru, **Герасименко Э.М.**[1] gerasimenko.em@dvfu.ru,
Скварник И.С.[1] skvarnik.is@dvfu.ru, **Комаров Д.А.**[2] dmitrij.komarov.76@list.ru,
Костенко С.С.[2,] man82869@yandex.ru
[1]Дальневосточный федеральный университет, [2]Центр беспилотных систем Приморского края

Аннотация. Рассматривается задача повышения точности расчёта принимаемой мощности на радиорелейных линиях (РРЛ) диапазона 18 ГГц над морской поверхностью. Предложена гибридная модель, объединяющая детерминированный двухлучевой расчёт с учётом коэффициента шероховатости Миллера–Брауна и стохастическое моделирование методом Монте-Карло (N = 300 реализаций) для учёта флуктуаций шероховатости морской поверхности. Расчёт точки зеркального отражения выполняется итерационным методом для сферической Земли с эффективным радиусом $a_e = k \cdot R_0$, где k-фактор определяется по Рекомендации МСЭ-Р Р.453 из фактических метеопараметров. Геоинформационный модуль (ГИС-модуль) формирует высотный профиль трассы на основе цифровой модели рельефа SRTM 1-arc с билинейной интерполяцией и автоматической классификацией подстилающей поверхности «суша/море» методом пространственных индексов R-tree. Верификация выполнена на действующей РРЛ 18 ГГц (трасса Уссурийского залива, длина 21,7 км, высоты антенн 16 м и 16 м над уровнем моря). Показано, что стохастическая модель обеспечивает отклонение от натурных измерений уровня принимаемого сигнала (RSSI) не более 1 дБ против 2,3 дБ у модели потерь в свободном пространстве (FSPL) и 4,3 дБ у чисто детерминированной модели. Среднеквадратическое отклонение (СКО) флуктуаций принимаемой мощности в стохастической модели составляет 2–4 дБ, что соответствует типичным значениям для морских трасс диапазона 10–20 ГГц при умеренном волнении.

Ключевые слова: радиорелейная линия, морское распространение радиоволн, двухлучевая модель, метод Монте-Карло, коэффициент Миллера–Брауна, k-фактор, ГИС-моделирование, зона Френеля, Рекомендация МСЭ-Р Р.453.
Для цитирования: Стаценко Л.Г., Герасименко Э.М., Скварник И.С., Комаров Д.А., Костенко С.С. Верификация стохастической модели двухлучевого распространения радиоволн над морской поверхностью на РРЛ-трассе 18 ГГц в Уссурийском заливе. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 358—365. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.066

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.066

Verification of a stochastic two-ray radio-wave propagation model over the sea surface on an 18 Ghz radio relay link in Ussuri bay

Lyubov G. Statsenko[1] statsenko.lg@vfu.ru, **Eduard M. Gerasimenko**[1] gerasimenko.em@dvfu.ru,
Igor S. Skvarnik[1] skvarnik.is@dvfu.ru, **Dmitry A. Komarov**[2] dmitrij.komarov.76@list.ru,
Sergey S. Kostenko[2] man82869@yandex.ru
[1]Far Eastern Federal University, Ajax Bay 10, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; [2]Center for Unmanned Systems of Primorsky Krai

Abstract. The paper addresses the problem of improving the accuracy of received-power prediction for maritime microwave radio relay links (RRL) in the 18 GHz band. A hybrid propagation model is proposed which combines a deterministic two-ray calculation (with the Miller–Brown roughness reduction coefficient and the spherical-Earth divergence factor) with Monte Carlo stochastic simulation (N = 300 realisations) accounting for random fluctuations of the sea-surface roughness. The specular reflection point is located by a spherical-Earth iterative procedure (ITU-R P.2001, Annex A.5); the effective Earth-radius factor k is computed dynamically from in-situ meteorological data following Recommendation ITU-R P.453. A geographic information system (GIS) module builds the terrain profile from the SRTM 1-arc digital elevation model with bilinear interpolation and performs automatic land/sea classification using R-tree spatial indexing. The model is verified against measurements on an operational 18 GHz radio relay link crossing Ussuri Bay (21.7 km, antenna heights 16 m and 16 m above mean sea level, 14 May 2026). The stochastic model yields a deviation of 0.5 dB from the measured received-signal-strength indicator (RSSI), compared with 2.3 dB for the free-space path-loss (FSPL) model and 4.3 dB for the deterministic two-ray model. The standard deviation of received-power fluctuations in the stochastic model is 2–4 dB, which is consistent with typical values reported for 10–20 GHz maritime links under moderate sea state. The proposed model is suitable for precise design of maritime radio relay links and for justification of the fade margin in accordance with ITU-R P.530.

© Стаценко Л.Г., Герасименко Э.М., Скварник И.С., Комаров Д.А., Костенко С.С. 2026

Keywords: radio relay link, maritime propagation, two-ray model, Monte Carlo simulation, Miller–Brown roughness coefficient, k-factor, GIS modelling, Fresnel zone, ITU-R P.453, model verification.
For citation: Lyubov G. Statsenko, Eduard M. Gerasimenko[1], Igor S. Skvarnik, Dmitry A. Komarov Verification of a stochastic two-ray radio-wave propagation model over the sea surface on an 18 GHz radio relay link in Ussuri Bay. Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 358—365. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.066

Введение

Радиорелейные линии (РРЛ) диапазона 10–40 ГГц обеспечивают магистральную связь в прибрежных зонах между портовыми объектами. В отличие от наземных трасс, морские трассы характеризуются высоким модулем коэффициента отражения от водной поверхности ($|R| \approx 0{,}85$–$0{,}99$ при углах скольжения $\theta < 5°$) [1], что приводит к выраженной двухлучевой интерференции. Мгновенный уровень принимаемого сигнала флуктуирует на 2–8 дБ в зависимости от состояния моря [2, 3].

Стандартная модель потерь в свободном пространстве (FSPL) даёт систематическую ошибку для морских трасс, поскольку не учитывает ни конструктивного, ни деструктивного вкладов зеркального луча. Детерминированная двухлучевая модель, напротив, выполняет когерентное суммирование лучей, фиксируя мгновенную геометрию. При усреднении по времени, которое физически реализует измерительный приёмник, результат существенно отличается от пика интерференционной картины [3].

Стохастический подход, основанный на методе Монте-Карло, устраняет это противоречие: многократно варьируя параметры шероховатости поверхности согласно статистическому распределению волнения, он воспроизводит усреднённый уровень сигнала и его флуктуации [4, 5]. Верификация таких моделей на натурных трассах Дальнего Востока России в открытой литературе практически отсутствует, что определяет актуальность настоящей работы.

Цель работы — разработать и верифицировать гибридную модель расчёта принимаемой мощности на морских РРЛ, объединяющую ГИС-анализ трассы, детерминированный двухлучевой расчёт с учётом шероховатости морской поверхности и стохастическое моделирование флуктуаций методом Монте-Карло.

ГИС-модуль построения профиля трассы

Вычислительный ГИС-модуль включает пять этапов. На первом этапе геодезическая линия между точками A и B разбивается на точки с шагом 50 м посредством алгоритма Карни [6] для эллипсоида WGS-84 (математическая модель Земли, принятая в качестве стандарта глобальной системы координат; реализована через библиотеку GeographicLib). Это обеспечивает погрешность по расстоянию менее 1 мм, что существенно превосходит приближение плоской Земли, дающее смещение до нескольких десятков метров на трассах длиной более 10 км.

На втором этапе для каждой промежуточной точки из растра SRTM 1-arc (Shuttle Radar Topography Mission — глобальная цифровая модель высот земной поверхности, тайл N43E131) средствами библиотеки Rasterio извлекается высота методом билинейной интерполяции:

$$h(r,c)=h_{00}(1-\delta r)(1-\delta c)+h_{01}(1-\delta r)\delta c+ \\ +h_{10}\delta r(1-\delta c)+h_{11}\delta r\delta c \qquad (1)$$

где h_{00}, h_{01}, h_{10}, h_{11} — высоты в четырёх соседних пикселях растра, δr, δc — дробные части строковой и столбцовой координат целевой точки.

На третьем этапе каждая точка трассы классифицируется как «суша» или «море» пространственным запросом к векторному слою береговой линии (Natural Earth, EPSG:4326) с применением индекса R-tree библиотеки GeoPandas. Сложность одного запроса O(log N) против O(N) при линейном переборе.

На четвёртом этапе к абсолютной высоте каждой точки прибавляется поправка на кривизну Земли:

$$\Delta h=\frac{d_1*d_2}{2*k*R_0} \qquad (2)$$

где d_1, d_2 — расстояния от точки до концов трассы, км; $R_0 = 6371$ км; k — k-фактор.

На пятом этапе алгоритм проверяет выполнение условия просвета первой зоны Френеля:

$$r_1=\sqrt{\lambda*d_1*\frac{d_2}{d}} \qquad (3)$$

где λ — длина волны, м; $d = d_1 + d_2$. По Рекомендации МСЭ-Р P.530 требуется зазор $C \geq 0{,}6\cdot r_1$ во всех точках профиля [2]. На исследуемой трассе минимальный зазор составил $0{,}72\cdot r_1$ у точки A, что соответствует требованию.

На рис. 1 представлен высотный профиль исследуемой трассы с первой зоной Френеля.

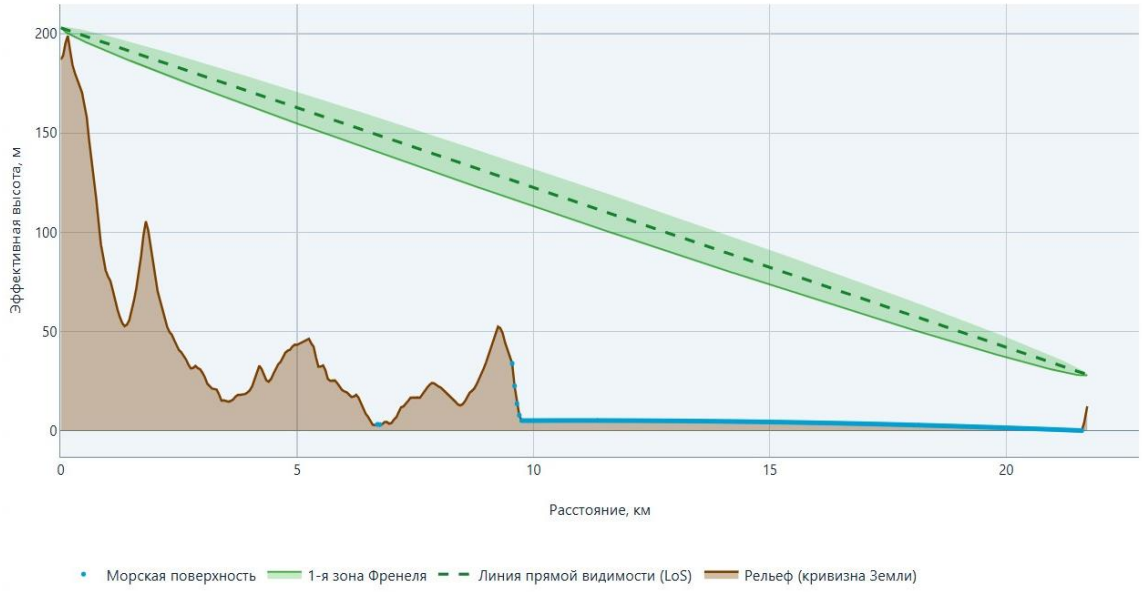


Рис. 1. Высотный профиль радиотрассы Уссурийского залива (21,7 км, k ≈ 1,394)
Fig. 1. Terrain profile of the Ussuri Bay radio link (21.7 km, k ≈ 1.394)

Детерминированная двухлучевая модель

Принимаемая мощность описывается уравнением баланса линии:

$$P_{rx}=P_{tx}+G_{tx}+G_{rx}-L_{tx}-L_{rx}-FSPL-L_{atm}-$$
$$-L_{diff}+20\lg F \qquad (4)$$

где $FSPL = 20\lg d + 20\lg f + 32{,}44$ дБ (d — расстояние, км; f — частота, МГц) — потери в свободном пространстве; L_atm — газовое поглощение (МСЭ-Р Р.676 [7]); L_diff — дифракционные потери; F — интерференционный множитель.

Положение точки зеркального отражения определяется итерационным методом для сферической формы по Приложению А.5 Рекомендации МСЭ-Р Р.2001 [11]: начальное приближение — плоская Земля, $d_1^{\circ} = D\cdot h\_tx/(h\_tx + h\_rx)$; практически устойчивое решение достигалось за 5–10 итераций до выполнения критерия сходимости.

Атмосферные параметры и k-фактор

k-фактор рассчитывается из приземного радиорефракционного индекса по Рекомендации МСЭ-Р Р.453 [12]:

$$N_s=\left(\frac{77{,}6}{T}\right)*\left(P+4810*\frac{e}{T}\right) \qquad (5)$$

$$\frac{dN}{dh}=-7{,}32*exp(0{,}005577*N_s),\ k=\frac{157}{157+\frac{dN}{dh}} \qquad (6)$$

где T — температура воздуха, К; P — давление, гПа; e — давление водяного пара, гПа. Давление водяного пара рассчитывается из температуры и относительной влажности RH:

$$e=6{,}1121*exp\left(\left(18{,}678-\frac{T_C}{234{,}5}\right)*\frac{T_C}{257{,}14+T_C}\right)*\frac{RH}{100} \qquad (7)$$

При метеоусловиях верификационного эксперимента (T = 12 °C, P = 1015 гПа, RH = 80 %) получено k ≈ 1,394, что согласуется с типовыми значениями для прибрежной зоны Японского моря по Рекомендации МСЭ-Р Р.452 [13].

Газовое поглощение рассчитывается по Рекомендации МСЭ-Р Р.676-13 для кислорода и водяного пара. При f = 18 ГГц и приведённых метеоусловиях удельное поглощение составляет около 0,06 дБ/км; полное поглощение на трассе 21,7 км — 1,3 дБ.

Высота испарительного волновода оценивалась по упрощённой NPS-модели: h_duct ≈ 7,4 м при данных условиях. Критическая частота волновода такой высоты существенно превышает 18 ГГц, поэтому его влияние на исследуемой трассе несущественно, что согласуется с результатами [14].

Стохастическая модель Монте-Карло

В каждой реализации i параметр шероховатости подчиняется нормальному закону распределения:

$$\sigma_{h,i}=\sigma_h*(1+\xi_i),\ \xi_i\sim N(0,\delta^2) \qquad (8)$$

где δ = 0,3. Обоснование нормального распределения: по центральной предельной теореме высота морской волны, складывающаяся из суперпозиции большого числа независимых гармонических составляющих, распределена нормально [4]. Значение δ = 0,3 обеспечивает СКО флуктуаций принимаемой мощности 2–4 дБ, что соответствует наблюдаемым значениям для морских трасс диапазона 10–20 ГГц при умеренном волнении [2, 3].

Для каждой реализации i по формуле (4) вычисляется мгновенное значение P_rx,i. Стохастическое среднее:

$$\langle P_{rx}\rangle=\left(\frac{1}{N}\right)\cdot\Sigma_i P_{rx,i} \qquad (9)$$

При N = 300 СКО оценки среднего σ_P/√N ≤ 0,17 дБ — существенно меньше погрешности измерений RSSI (±0,5 дБ).

Для имитации временных флуктуаций строится ряд из N_t = 60 последовательных реализаций с шагом 10 с. Для воспроизводимости результатов генератор псевдослучайных чисел инициализируется фиксированным зерном (seed = 42). Расхождение между средним уровнем сигнала во времени и средним расчётным значением составило менее 0,2 дБ, что подтверждает способность модели Монте-Карло достоверно описывать реальную динамику сигнала.

На рис. 2 приведён типичный временной ряд RSSI на конечном узле трассы.



Рис. 2. Временной ряд принимаемой мощности (стохастическая модель, конечный узел трассы)
Fig. 2. Time series of the received power (stochastic model, terminal node of the link)

Объект верификации и условия измерений

Объектом верификации служит действующая РРЛ, пересекающая акваторию Уссурийского залива. Параметры трассы: расстояние 21,721 км (вычислено алгоритмом Карни); высоты антенн 16 м и 16 м (над уровнем моря); рабочая частота 17 975 МГц (диапазон 18 ГГц); мощность передатчика P_tx = 21,0 дБм; усиление антенн G = 38,5 дБи (антенна типа НРХ, апертура 0,6 м); потери в фидере L_фид = 0,5 дБ × 2; поляризация — горизонтальная.

Натурные измерения выполнены 14.05.2026 в 11:02 местного времени. Показания RSSI: А → В = −47,0 дБм. В качестве эталонного значения принято P_rx = −47,0 дБм.

Метеоусловия в момент измерений: T_a = 12 °C, T_w = 8 °C, RH = 80 %, P = 1015 гПа, U = 5 м/с, осадки и туман отсутствуют.

Результаты и обсуждение

Результаты расчёта по трём моделям сведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение результатов моделирования с натурными измерениями

Table 1 — Comparison of simulation results with field measurements

Модель расчёта / Model	P_rx, дБм / dBm	Δ, дБ / dB
Натурные измерения (эталон)	−47,0	—
FSPL (свободное пространство)	−49,27	−2,27
Детерминированная двухлучевая	−42,74	+4,26
Стохастическая (N = 300)	−46,52	+0,48

Отклонение FSPL (−2,27 дБ) обусловлено отсутствием в модели вклада отражённого луча: при данной геометрии зеркальная волна взаимодействует с прямой в режиме, близком к деструктивному, ослабляя результирующий сигнал ниже FSPL. Детерминированная модель, напротив, фиксирует мгновенный конструктивный максимум (F > 1), поскольку фаза φ = 2π·Δr/λ при данном расстоянии попадает в область конструктивного сложения. Реальный приёмник усредняет сигнал по множеству случайных состояний волнения за время измерения, поэтому зафиксированное значение −47,0 дБм соответствует стохастическому среднему, а не пику интерференционной картины.

Стохастическая модель воспроизводит это усреднение явно: 300 реализаций покрывают распределение возможных состояний волнения при U = 5 м/с, и среднее совпадает с натурным значением с точностью 0,5 дБ.

На рис. 3 показано распределение RSSI вдоль трассы для всех трёх моделей.

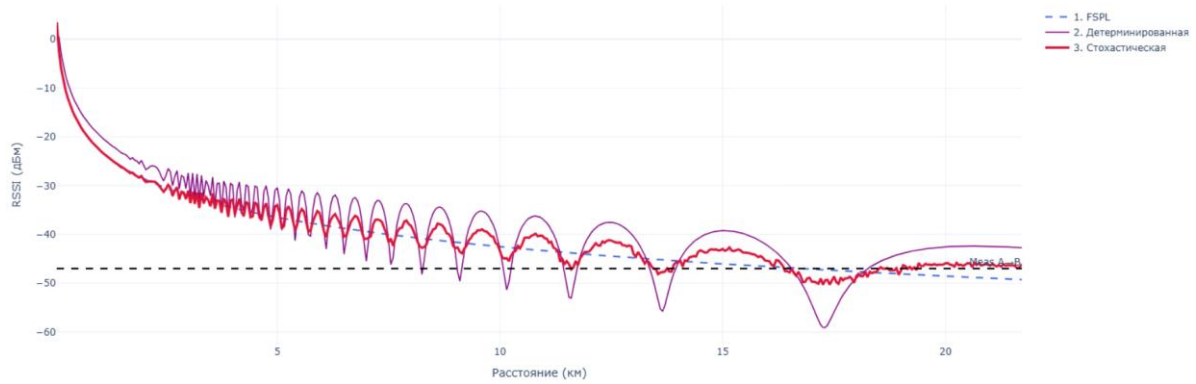


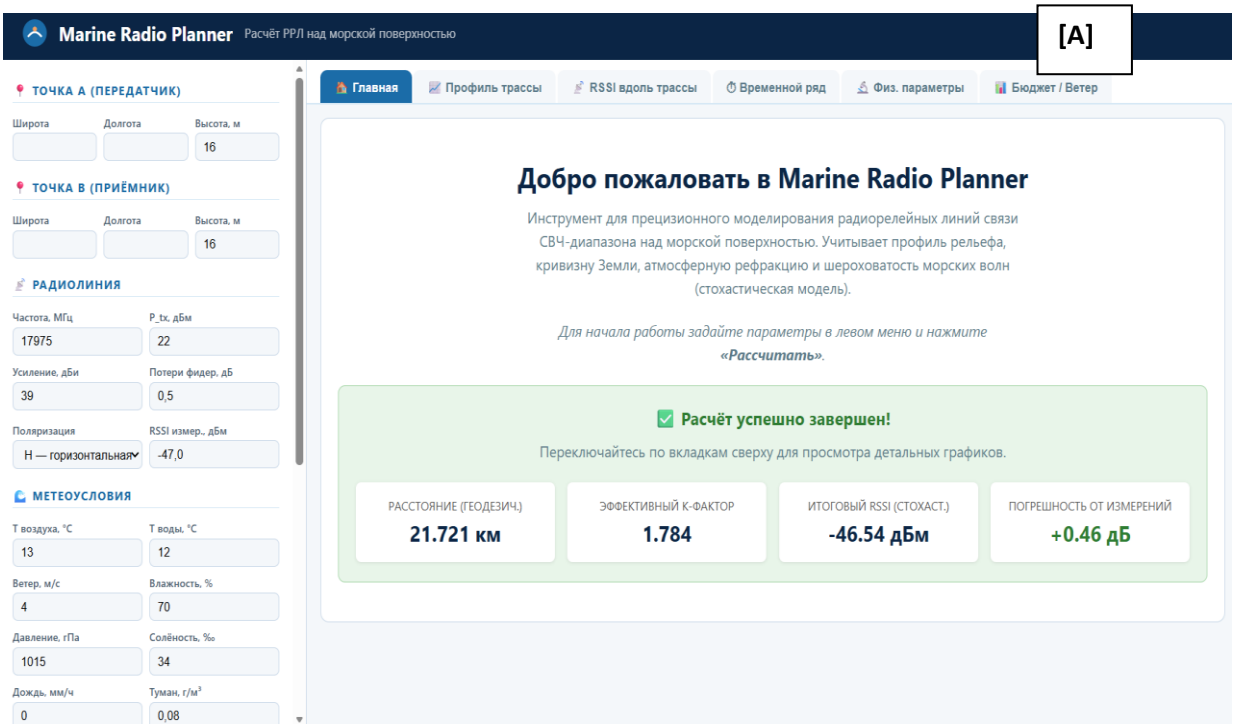
Рис. 3. Расчётный RSSI вдоль трассы Уссурийского залива (три модели)
Fig. 3. Computed RSSI along the Ussuri Bay link (three models)

Интерференционные максимумы и минимумы (рис. 3) свидетельствуют о выраженной двухлучевости на морском участке. Детерминированная кривая демонстрирует глубокие минимумы до −59 дБм на расстоянии около 17 км. Стохастическая огибающая «сглаживает» эти экстремумы до СКО 2–4 дБ, что физически соответствует усреднению за счёт непостоянства волнения.

Для количественной оценки точности трёх моделей введём абсолютное отклонение от натурного значения $|\Delta| = |P_{rx,мод} - P_{rx,изм}|$. На данном примере стохастическая модель обеспечивает $|\Delta| = 0{,}5$ дБ — более чем в четыре раза меньше, чем FSPL (2,3 дБ), и почти в девять раз меньше, чем детерминированная модель (4,3 дБ).

Программный комплекс

Программный комплекс, реализующий описанную модель, выполнен в виде веб-приложения «Marine Radio Planner» для работы в браузерах на мобильных и стационарных устройствах. Вычислительное ядро написано на Python 3.12.0, пользовательский интерфейс — на Flask с динамической визуализацией графиков (рис. 4 а, б).



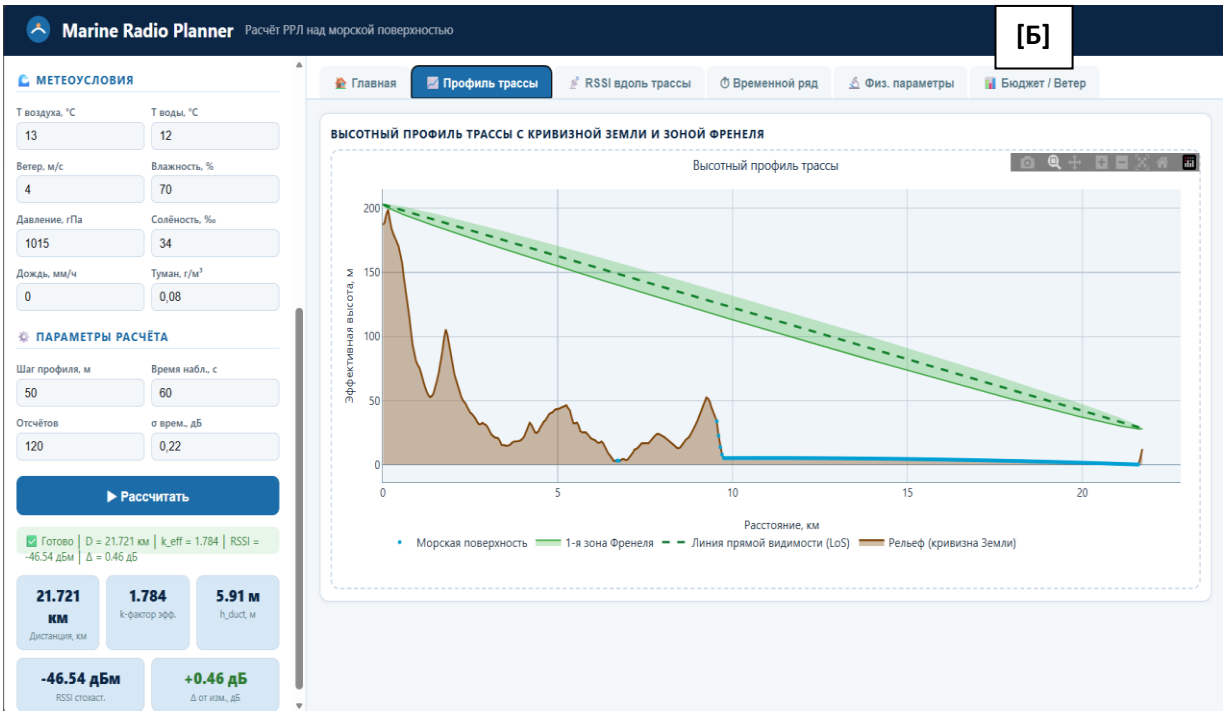


Рис. 4. Веб-приложение «Marine Radio Planner»: а — главная страница и панель параметров; б — графики RSSI вдоль трассы

Fig. 4. Marine Radio Planner web application: a — main page and parameter panel; b — RSSI plots along the link

Заключение

Разработана гибридная модель расчёта принимаемой мощности на морских РРЛ диапазона 18 ГГц. Модель объединяет ГИС-модуль формирования профиля трассы с динамическим k-фактором (Рекомендация МСЭ-Р Р.453), детерминированный двухлучевой расчёт с коэффициентами Миллера–Брауна, Френеля и сферической дивергенции, а также стохастическое моделирование флуктуаций шероховатости методом Монте-Карло.

Верификация на действующей РРЛ 18 ГГц (трасса Уссурийского залива, 21,7 км) показала, что стохастическая модель обеспечивает отклонение 0,5 дБ от натурных измерений RSSI — более чем в четыре раза точнее модели FSPL и почти в девять раз точнее детерминированной модели. СКО флуктуаций принимаемой мощности в стохастической модели составляет 2–4 дБ при умеренном волнении (U = 5 м/с).

Предложенная модель пригодна для прецизионного проектирования морских РРЛ, обоснования запаса по замираниям и расчёта вероятности перерывов связи в соответствии с Рекомендацией МСЭ-Р Р.530. Дальнейшее развитие работы предполагает расширение верификационной выборки, добавление расчёта зон покрытия секторных базовых станций и исследование суперрефракционных режимов.

Данная работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности по проекту №FZNS-**2026-0007**.

Литература

1. Yang K., Shi Y., Yao X., Zhao M. Analysis of multipath propagation over sea surface at X-band and Ku-band // Radio Science. 2022. Vol. 57, No. 4. e2021RS007340.
2. Рекомендация МСЭ-Р Р.530-18. Данные о распространении и методы прогнозирования, необходимые для проектирования наземных систем прямой видимости. Женева: МСЭ, 2021. 64 с.
3. Xu Z., Wu J., Wu Z. A survey on the propagation characteristics of microwave over sea surface // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2023. Vol. 65, No. 1. P. 38–51.
4. Gao Y., Shao Q., Yan B., Li Q., Guo S. Parabolic equation modeling of electromagnetic wave propagation over rough sea surfaces // Sensors. 2019. Vol. 19, No. 5. Art. 1252.
5. Лытаев М. С. Численный анализ влияния неопределённости высоты волновода испарения на тропосферное распространение радиоволн // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 1. С. 1–18.
6. Karney C. F. F. Algorithms for geodesics // Journal of Geodesy. 2013. Vol. 87, No. 1. P. 43–55.
7. Рекомендация МСЭ-Р Р.676-13. Ослабление в атмосферных газах и соответствующие эффекты. Женева: МСЭ, 2022. 31 с.
8. Рекомендация МСЭ-Р Р.527-6. Электрические характеристики поверхности Земли. Женева: МСЭ, 2024. 24 с.

9. Miller A. R., Brown R. M., Vegh E. New derivation for the rough-surface reflection coefficient and for the distribution of sea-wave elevations // IEE Proceedings, Part H: Microwaves, Optics and Antennas. 1984. Vol. 131, No. 2. P. 114–116.
10. Рекомендация МСЭ-Р Р.526-15. Распространение посредством дифракции. Женева: МСЭ, 2019. 60 с.
11. Рекомендация МСЭ-Р Р.2001-5. Универсальная широкодиапазонная модель распространения для наземных трасс в полосе частот 30 МГц – 50 ГГц. Женева: МСЭ, 2021. 56 с.
12. Рекомендация МСЭ-Р Р.453-14. Радиорефракционный индекс атмосферы: формулы и данные о рефракции. Женева: МСЭ, 2019. 28 с.
13. Рекомендация МСЭ-Р Р.452-18. Метод прогнозирования для оценки помех между станциями на поверхности Земли на частотах выше 0,1 ГГц. Женева: МСЭ, 2023. 76 с.
14. Захаров А. И., Зебхан Ф. М. Моделирование испарительного волновода над морской поверхностью для прибрежных зон умеренных широт // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64, № 9. С. 874–882.
15. Li J., Yin X., Bhatt D. Sea-surface roughness effects on microwave propagation for maritime channels // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2021. Vol. 15, No. 6. P. 567–577.

References

1. Yang K., Shi Y., Yao X., Zhao M. Analysis of multipath propagation over sea surface at X-band and Ku-band. Radio Science, 2022, vol. 57, no. 4, e2021RS007340.
2. Rekomendaciya MSE-R P.530-18. Dannye o rasprostranenii i metody prognozirovaniya, neobhodimye dlya proektirovaniya nazemnyh sistem pryamoj vidimosti [ITU-R Recommendation P.530-18. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems]. Geneva, ITU, 2021, 64 p.
3. Xu Z., Wu J., Wu Z. A survey on the propagation characteristics of microwave over sea surface. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2023, vol. 65, no. 1, pp. 38–51.
4. Gao Y., Shao Q., Yan B., Li Q., Guo S. Parabolic equation modeling of electromagnetic wave propagation over rough sea surfaces. Sensors, 2019, vol. 19, no. 5, art. 1252.
5. Lytaev M. S. Chislennyj analiz vliyaniya neopredelennosti vysoty volnovoda ispareniya na troposfernoe rasprostranenie radiovoln [Numerical analysis of the influence of evaporation-duct height uncertainty on tropospheric radio-wave propagation]. Zhurnal radioelektroniki [Journal of Radio Electronics], 2024, no. 1, pp. 1–18.
6. Karney C. F. F. Algorithms for geodesics. Journal of Geodesy, 2013, vol. 87, no. 1, pp. 43–55.
7. Rekomendaciya MSE-R P.676-13. Oslablenie v atmosfernyh gazah i sootvetstvuyushchie effekty [ITU-R Recommendation P.676-13. Attenuation by atmospheric gases and related effects]. Geneva, ITU, 2022, 31 p.
8. Rekomendaciya MSE-R P.527-6. Elektricheskie harakteristiki poverhnosti Zemli [ITU-R Recommendation P.527-6. Electrical characteristics of the surface of the Earth]. Geneva, ITU, 2024, 24 p.
9. Miller A. R., Brown R. M., Vegh E. New derivation for the rough-surface reflection coefficient and for the distribution of sea-wave elevations. IEE Proceedings, Part H: Microwaves, Optics and Antennas, 1984, vol. 131, no. 2, pp. 114–116.
10. Rekomendaciya MSE-R P.526-15. Rasprostranenie posredstvom difrakcii [ITU-R Recommendation P.526-15. Propagation by diffraction]. Geneva, ITU, 2019, 60 p.
11. Rekomendaciya MSE-R P.2001-5. Universal'naya shirokodiapazonnaya model' rasprostraneniya dlya nazemnyh trass v polose chastot 30 MGc – 50 GGc [ITU-R Recommendation P.2001-5. A general-purpose wide-range terrestrial propagation model in the frequency range 30 MHz to 50 GHz]. Geneva, ITU, 2021, 56 p.
12. Rekomendaciya MSE-R P.453-14. Radiorefrakcionnyj indeks atmosfery: formuly i dannye o refrakcii [ITU-R Recommendation P.453-14. The radio refractive index: its formula and refractivity data]. Geneva, ITU, 2019, 28 p.
13. Rekomendaciya MSE-R P.452-18. Metod prognozirovaniya dlya ocenki pomekh mezhdu stanciyami na poverhnosti Zemli na chastotah vyshe 0,1 GGc [ITU-R Recommendation P.452-18. Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz]. Geneva, ITU, 2023, 76 p.
14. Zaharov A. I., Zebhan F. M. Modelirovanie isparitel'nogo volnovoda nad morskoj poverhnost'yu dlya pribrezhnyh zon umerennyh shirot [Modelling of the evaporation duct over the sea surface for coastal zones of mid-latitudes]. Radiotekhnika i elektronika [Journal of Communications Technology and Electronics], 2019, vol. 64, no. 9, pp. 874–882.
15. Li J., Yin X., Bhatt D. Sea-surface roughness effects on microwave propagation for maritime channels. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2021, vol. 15, no. 6, pp. 567–577.

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

Стаценко Любовь Григорьевна — доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Дальневосточный федеральный университет», п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток, 690922, Россия, e-mail: statsenko.lg@dvfu.ru

Lyubov G. Statsenko — Dr. Sci. (Phys & Math), professor. Far Eastern Federal University, Ajax Bay, 10, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation, e-mail: statsenko.lg@dvfu.ru

Герасименко Эдуард Максимович — магистрант. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток, 690922, Россия, e-mail: gerasimenko.em@dvfu.ru

Eduard M. Gerasimenko — Master's Degree Student. Far Eastern Federal University, Ajax Bay, 10, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation, e-mail: gerasimenko.em@dvfu.ru

Скварник Игорь Святославович — кандидат технических наук, доцент. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Дальневосточный федеральный университет», п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток, 690922, Россия skvarnik.is@dvfu.ru

Igor S. Skvarnik — Ph.D. (Eng)., Associate Professor. Far Eastern Federal University, Ajax Bay, 10, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation, e-mail: skvarnik.is@dvfu.ru

Комаров Дмитрий Анатольевич — Генеральный директор. Автономная некоммерческая организация «Центр беспилотных систем Приморского края», г. Владивосток, ул. Толстого, д. 32А, 690014, Россия, e-mail: dmitrij.komarov.76@list.ru

Dmitry A. Komarov — General Director. Autonomous Non-Commercial Organization "Center for Unmanned Systems of Primorsky Krai", 32A Tolstoy St., Vladivostok, 690014, Russian Federation, e-mail: dmitrij.komarov.76@list.ru

Костенко Сергей Сергеевич — Первый заместитель генерального директора. Автономная некоммерческая организация «Центр беспилотных систем Приморского края», г. Владивосток, ул. Толстого, д. 32А, 690014, Россия, e-mail: man82869@yandex.ru

Sergey S. Kostenko — First Deputy General Director. Autonomous Non-Commercial Organization "Center for Unmanned Systems of Primorsky Krai", 32A Tolstoy St., Vladivostok, 690014, Russian Federation, e-mail: man82869@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/thearticlewassubmitted 13.07.2026.
Одобрена после рецензирования/approvedafterreviewing 20.07.2026.
Принятакпубликации/acceptedforpublication 31.07.2026.

Научная статья
УДК 519.85
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.067

Многопараметрическая классификация морских причальных сооружений с применением ГИС-модуля (на примере порта Новороссийск)

Бойко А.И.[1] ruzhay_ann@mail.ru**, Гончаренко С.Г.**[1] sony.goncharenko@yandex.ru
[1]Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В статье представлена архитектура ГИС-модуля для многопараметрической классификации морских причальных сооружений с учетом совокупности технико-эксплуатационных характеристик объектов. На основе десяти нормализованных признаков реализована двухэтапная процедура классификации: отбор наиболее информативных параметров выполнен методом случайного леса с оценкой важности по критерию Джини, непосредственное распределение причалов по классам осуществлено алгоритмом k-ближайших соседей (KNN). Разработанный модуль интегрирован в среду ArcGIS Pro с использованием библиотеки arcpy, что обеспечивает автоматизированное извлечение атрибутивных данных из пространственных объектов, выполнение классификационных процедур и визуализацию результатов в виде тематической карты. Показано, что применение многопараметрических критериев в сочетании с геоинформационными технологиями позволяет повысить обоснованность управленческих решений при планировании ремонтных работ, перераспределении грузопотоков и модернизации портовой инфраструктуры. Модуль обладает масштабируемостью и может быть адаптирован для классификации иных объектов морской инфраструктуры.
Ключевые слова: ГИС-модуль, классификация, морская инфраструктура, причалы, метод k-ближайших соседей, метод случайного леса, ArcGIS Pro, arcpy.
Для цитирования: Бойко А.И., Гончаренко С.Г. Многопараметрическая классификация морских причальных сооружений с применением ГИС-модуля (на примере порта Новороссийск), Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 366—374. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.067

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.067

Multiparametric classification of marine berthing facilities using a GIS module (using the Novorossiysk port as an example)

Anna I. Boyko[1] ruzhay_ann@mail.ru, **Sofia G**. **Goncharenko**[1] sony.goncharenko@yandex.ru
[1]Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. The article presents the architecture of a GIS module designed for the multi-parameter classification of marine berthing structures, taking into account a comprehensive set of technical and operational characteristics. A two-stage classification procedure was implemented based on ten normalized features: the selection of the most informative parameters was performed using the Random Forest method with Gini importance assessment, while the actual assignment of berths to classes was carried out using the k-nearest neighbors (KNN) algorithm. The developed module is integrated into the ArcGIS Pro environment using the arcpy library, enabling the automated extraction of attribute data from spatial features, the execution of classification procedures, and the visualization of results as a thematic map. It is demonstrated that the application of multi-parameter criteria combined with geoinformation technologies enhances the soundness of management decisions regarding repair planning, cargo flow redistribution, and port infrastructure modernization. The module is scalable and can be adapted for the classification of other maritime infrastructure assets.
Key words: GIS module, classification, marine infrastructure, berths, k-nearest neighbors method, Random Forest method, ArcGIS Pro, arcpy.
For citation: Anna I. Boyko, Sofia G. Goncharenko, Multiparametric classification of marine berthing facilities using a GIS module (using the Novorossiysk port as an example). Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 366—374. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.067

Введение

В условиях возрастающей роли морских портов как ключевых элементов транспортно-логистической инфраструктуры, обеспечивающих внешнеэкономические связи и национальную безопасность, а также в условиях роста грузооборота, увеличения тоннажа судов и ужесточения экологических требований вопросы эффективного управления портовыми активами, в первую очередь причальными сооружениями, приобретают стратегическое значение. Как отмечается в исследованиях по цифровой трансформации портовой инфраструктуры, внедрение современных информационных технологий позволяет повысить эффективность управления активами на 15% и снизить затраты на техническое обслуживание на 10% [ ]. Морские причалы, являясь основными производственными фондами порта, определяют его пропускную способность, специализацию и конкурентоспособность, что делает их классификацию по технико-эксплуатационным параметрам важной научно-практической задачей.

В работах отечественных исследователей [1-3] подчёркивается необходимость внедрения

© Бойко А.И., Гончаренко С.Г. 2026

геоинформационных систем (ГИС) как инструмента для решения задач управления территориально-экономическими процессами на морском транспорте. Так, ГИС, интегрированные с экономическими системами транспортных предприятий, позволяют повысить эффективность принятия управленческих решений за счёт комплексного анализа пространственных и атрибутивных данных, представляющих цифровую модель объектов морской инфраструктуры. Современные исследования в области портового менеджмента указывают на активный переход портового сектора к цифровизации, что является следствием четвёртой промышленной революции [4].

Вместе с тем, как показывает анализ публикаций, в существующих подходах к классификации причалов преобладают однопараметрические методы, основанные на выделении одного доминирующего признака (например, типа груза или глубины у причала), что не позволяет учесть совокупность взаимосвязанных характеристик объекта и приводит к существенным искажениям результата при отнесении причала к той или иной категории. Согласно классическим работам по морским гидротехническим сооружениям, причальные сооружения традиционно подразделяются на набережные, пирсы и рейдовые причалы по расположению в плане, а по конструктивному исполнению – на гравитационные, свайного типа и смешанные. Однако такая классификация не учитывает комплекс эксплуатационных характеристик, необходимых для современного управления портовым хозяйством.

В исследованиях по многопараметрической классификации объектов [5-7] обоснована необходимость перехода к комплексной оценке объектов по системе разнородных признаков с последующей их нормализацией для устранения размерностных эффектов. Однако применительно к объектам портовой инфраструктуры подобные методики, основанные на современных алгоритмах машинного обучения и интегрированные в ГИС-среду, практически не разработаны. Международный опыт показывает, что интеграция BIM (Building Information Model) и ГИС-технологий способна революционизировать портовое планирование, обеспечивая обмен данными в реальном времени, расширенный пространственный анализ и моделирование операционных сценариев. Внедрение таких систем обеспечивает мониторинг активов в реальном времени, оптимизированное планирование технического обслуживания и повышенную операционную устойчивость. Кроме этого, с развитием машинного обучения и искусственного интеллекта (ИИ) классификационные методы теперь помогают не только ориентироваться в знаниях, но и обучают алгоритмы в распознавании образов, переводе текстов, прогнозированию аномалий и многому другому.

Современные геоинформационные системы, такие как ArcGIS Pro, обладают встроенными средствами пространственного анализа и поддержкой библиотеки arcpy для автоматизации геообработки, что создаёт предпосылки для реализации многопараметрической классификации морских причалов в единой цифровой среде [8]. Вместе с тем, проблема отсутствия специализированных ГИС-инструментов для комплексной классификации объектов морской инфраструктуры остаётся нерешённой. Использование изолированных признаков или эвристических правил не обеспечивает необходимой точности и объективности при дифференциации объектов морской инфраструктуры по функциональному назначению и техническому состоянию, особенно в условиях модернизации портовых мощностей и диверсификации грузопотоков.

Методы машинного обучения для классификации пространственных объектов ГИС

Рассмотрим основные методы классификации геопространственных объектов.

Наиболее часто применяемый в ГИС метод классификации по спектральным признакам представляет собой автоматическое распознавание объектов на растровых изображениях (аэро- и космоснимках), основанный на анализе значений яркости пикселей в различных спектральных диапазонах. Он группирует схожие спектральные сигнатуры для создания тематических карт. Этот метод также называют неконтролируемой классификацией, то есть без обучения. Наиболее популярными среди алгоритмов неконтролируемой классификации (кластеризации) являются алгоритмы: K-Means (К-средних) и ISODATA.

Метод объектной классификации – это система, которая разделяет объекты на классы на основе их пространственного представления (точки, линии, полигоны) и набора атрибутов (характеристик), обеспечивая однозначное определение принадлежности объектов к классификационным группировкам.

Объектная классификация в ГИС включает следующие этапы [6, 7]:

- предварительная обработка данных, задача которой выделить количественные и качественные признаки;
- нормировка, используемая для приведения анализируемых признаков к единым масштабу и точке отсчета;
- взвешивание – процесс назначения весов (обычно задаются экспертным способом) для показателей необходим для корректного проведения географических классификаций;
- снижение размерности используется для уменьшения влияния взаимных корреляций признаков и снижения трудоемкости последующих процедур классификации;
- агрегирование в наиболее простой интерпретации является одним из методов перехода от множества исходных показателей к единственному, по которому следует различать пространственные объекты.
- идентификация позволяет установить связь между внешней таблицей и слоем карты, чтобы однозначно сопоставить атрибутивную и внешнюю таблицы, что является стандартной операцией баз данных.

Как было отмечено выше, в последнее время для анализа и обработки геопространственных данных стали широко применяться интеллектуальные методы в ГИС, основанные на ИИ. Ниже приведены основные интеллектуальные методы классификации объектов ГИС.

Вероятностный метод – наивный байесовский

классификатор (НБК), основанный на применении теоремы Байеса, вычисляет вероятность принадлежности объекта к классу на основе условных вероятностей признаков, предполагая их независимость [5]. НБК прост в реализации, имеет высокую скорость обучения и предсказания, масштабируем. Но метод делает предсказание о независимости признаков, что не всегда верно, также может показывать низкую точность при корреляции признаков.

Логический метод, представленный деревом решений в ГИС – тип контролируемого алгоритма машинного обучения, который используется инструментом Обучение с использованием AutoML и классифицирует регрессию данных, используя истинные или ложные ответы на определенные вопросы.

Метод случайного леса (Random Forest) представляет собой ансамблевый алгоритм, состоящий из множества деревьев решений, построенных на случайных подвыборках исходных данных. Каждое дерево в лесу строится до исчерпания выборки без «обрезки», при разделении узлов выбираются случайные наборы параметров, а решение принимается на основе «большинства голосов».

Для оценки важности признаков в методе случайного леса применяется критерий Джини – мера неоднородности (impurity) набора данных, показывающая вероятность того, что случайно выбранный объект из набора будет ошибочно классифицирован, если ему присваивать метку на основе распределения классов в узле.

Метод k-ближайших соседей (k-Nearest Neighbors, KNN) является одним из основных методов машинного обучения при решении задач классификации и относится к так называемым lazy learning методам, которые не строят модель во время обучения, а запоминают весь набор данных и на основе этого набора вычисляют результат. Это «непараметрический метод контролируемой классификации объектов, основанный на ближайших обучающих примерах в пространстве переменных».

Алгоритм KNN работает следующим образом: для классификации нового наблюдения q находятся k наиболее близких к нему в смысле выбранной метрики расстояния объектов датасета $X_{k(q)} = \left\{x_q^{\{(1)\}}, \dots, x_q^{\{(k)\}}\right\}$, при этом выполняется условие:

$$\forall x_{\{in\}} \in X_{k(q)}, \forall x_{\{out\}} \in X_{k(q)\backslash backslash} X : r\left(q, x_{\{in\}}\right) < r\left(q, x_{\{out\}}\right). \quad (1)$$

Класс нового наблюдения определяется на основе найденных ближайших соседей – чаще всего используется частотный способ выбора, то есть выбирается наиболее часто встречающееся значение целевой переменной среди k ближайших соседей. Данный метод классифицирует объект к тому классу, к которому принадлежит большинство из k ближайших по метрике сходства соседей. Метод не требует обучения, но чувствителен к выбору метрики и параметра k. Алгоритм начинает работать с набора данных, где каждый объект представлен набором признаков и имеет метку классов [9]. Далее выбирается n-ближайших соседей, вычисляется минимальное расстояние между новым и ближайшим объектом, применяя следующие метрики: евклидово расстояние, манхэттенское расстояние и косинусное расстояние.

Преимуществом данного алгоритма является интерпретируемость, отсутствие допущения о данных, гибкость, устойчивость к выбросам и аномальным значениям. К недостаткам относиться медленное прогнозирование, высокая вычислительная сложность, отсутствие явной модели.

Разработка и апробация ГИС-модуля многопараметрической классификации

Рассмотрим задачу многопараметрической классификации причальных сооружений порта Новороссийск (крупнейшего порта Российской Федерации, расположенного на побережье Чёрного моря) методом k-ближайших соседей. Для апробации разработанной и приведенной ниже архитектуры ГИС-модуля сформирована выборка из 65 причальных сооружений, расположенных в различных районах акватории порта Новороссийск и характеризующихся разнообразием технико-эксплуатационных параметров.

Для каждого причального сооружения был собран набор из тринадцати характеристик, отражающих его техническое состояние, эксплуатационные возможности и функциональное назначение, среди которых наиболее значимыми оказались тип (название пристани), назначение (принимаемые виды грузов), длина (протяженность причального фронта), глубина (расстояние от уровня воды до дна акватории у причального сооружения), осадка судов (глубина погружения корпуса судна в воду), физическое состояние (комплексная характеристика, которая отражает степень износа, наличие повреждений и отклонений от проектных параметров его конструктивных элементов), правовой статус (юридическое основание использования причала), эксплуатационная загрузка (уровень использования причала), доступность для исследования (степень физической и организационной доступности причала для проведения обследования), эксплуатирующая организация (предприятия, владеющие причалом).

Собранные из открытых источников данные были использованы для классификации методом k-ближайших соседей. Поскольку этот алгоритм работает исключительно с числовыми признаками, категориальные переменные были преобразованы в числовой код (балльные оценки).

Целевой переменной многопараметрической классификации морских причальных сооружений является категория причала, которая может принимать одно из пяти значений:

– класс A – критически важные причалы для ключевых грузов (зерно, нефть, контейнеры), которые характеризуются отличным состоянием, высокой загрузкой, полным пакетом документов, требуют превентивного обслуживания;

– класс B – интенсивно используемые в текущей операционной деятельности порта, имеющие износ 30-50% и плановую загрузку, требующие регулярный плановый ремонт;

– класс C – вспомогательные для второстепенных грузов или используемые как резервные мощности, имеющие средние параметры и износ 50-70%,

загрузку ниже средней, требующие наблюдения и выборочного ремонта;

– класс D – ограниченно пригодные, имеющие значительный износ (>70%), ограничения по осадке или длине, низкую загрузку, неполный юридический статус, требующие либо модернизации, либо вывода из эксплуатации;

– класс E – аварийные или подлежащие реконструкции, имеют критический износ, не соответствуют современным судам, эксплуатационная загрузка минимальна или отсутствует.

Разработка ГИС-модуля многопараметрической классификации причальных сооружений была выполнена в среде ArcGIS Pro. Для автоматизации геообработки была применена библиотека arcpy, позволяющая [11]:

– извлекать значения признаков из таблиц атрибутов пространственных объектов;

– выполнять последовательности инструментов геообработки;

– интегрировать процедуры классификации в единый конвейер анализа данных;

– записывать результаты классификации обратно в таблицы атрибутов.

Обработка и предобработка атрибутивных данных выполнялась с применением библиотек pandas, которая обеспечивала извлечение и структурирование данных из таблицы атрибутов, и NumPy для эффективной работы с числовыми массивами. Непосредственно классификация реализована с использованием библиотеки scikit-learn (sklearn) и алгоритма k-ближайших соседей (k-NN), что позволило достичь высокой точности отнесения объектов к целевым классам.

Архитектура ГИС-модуля многопараметрической классификации причальных сооружений включает следующие функциональные блоки.

Блок 1 выполняет функции предварительной обработки и отбора признаков для классификации причалов.

В ходе анализа было отобрано десять приведенных выше значимых параметров для классификации. Сначала признаки были нормированы для приведения их к единому масштабу и точке отсчёта. Для этого была применена формула нормировки по дисперсиям и математическим ожиданиям, так как параметры различны и несоизмеримы [6, 7]:

$$O_i^{(j)} = \frac{O_i^{(j)} - \overline{O^{(j)}}}{\sqrt{\mathrm{var}(O_i^{(j)})}} \; \forall\, j \in \{1, \dots, M\}, i \in \{1, \dots, N\}, \quad (2)$$

где $\overline{O^{(j)}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} O_i^{(j)}$ – оценка математического ожидания j-го показателя; $var(O_i^{(j)}) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(O_i^{(j)} - O^{(j)})^2$ – оценка дисперсии j-го показателя.

Фрагмент полученной нормированной таблицы по отбору признаков показан на рис. 1.

Тип	Назначение	Длина	Глубина	ОсадкаСудов	ФизическоеСостояние (%)	ПравовойСтатус	ЭксплуатационнаяЗагрузка (%)	ДоступностьДляИсследования	ЭксплуатирующаяОрганизация	ЛедовыеУсловия	НаличиеТрапа	НаличиеМостика
17,003	32,042	-0,829	-2,503	-0,517	2,998	5,683	-48,773	-1,198	1,166	0,000	0,000	1,000
8,672	21,584	-2,066	-2,370	-0,517	-1,291	44,477	-44,503	-1,198	15,783	1,000	0,000	0,000
2,783	-1,002	-2,066	-2,503	0,413	-2,339	-1,347	-41,343	-2,067	15,783	0,000	0,000	0,000
8,672	-1,598	-0,829	-2,503	0,413	-2,406	-1,121	-42,954	-0,931	2,593	1,000	0,000	0,000
-1,977	-2,327	-0,829	-2,503	0,413	-2,381	-1,461	-48,773	-0,931	0,210	0,000	1,000	0,000
-3,032	9,817	-1,350	-2,370	-2,067	-1,463	3,957	-12,844	-0,931	5,102	0,000	0,000	0,000
11,077	29,466	-1,350	-2,370	-1,757	-0,371	5,684	-7,705	-2,067	5,102	0,000	0,000	0,000
3,493	-2,106	1,319	-2,370	-1,757	-0,553	6,834	61,447	-0,931	11,722	0,000	0,000	0,000
-2,959	24,830	-1,350	-2,370	-2,067	-2,070	4,965	9,223	-0,931	9,264	1,000	0,000	0,000
3,152	29,466	-2,066	-2,370	-0,517	-0,553	4,983	-57,610	-2,067	5,102	0,000	1,000	0,000
-2,959	51,545	-2,066	-2,370	-2,067	2,099	4,965	-58,388	-2,067	5,102	0,000	0,000	1,000
9,189	21,584	-0,829	-2,503	-0,517	2,877	21,557	-37,930	1,675	1,947	0,000	0,000	0,000
27,225	23,726	-0,829	-2,503	-2,067	7,767	5,319	-44,503	1,675	8,056	0,000	1,000	0,000
0,328	51,234	1,319	-2,503	-2,067	-2,379	-1,224	-45,990	-2,067	12,956	0,000	0,000	0,000
6,488	1,592	-2,066	-2,503	-1,757	-0,588	0,911	-44,503	-2,067	1,535	0,000	0,000	1,000

Рис. 1. Фрагмент нормированной таблицы по отбору десяти признаков

Для отбора наиболее значимых признаков прогнозирования класса причальных сооружений применён метод случайного леса с оценкой важности признаков по критерию Джини. Процесс включал следующие этапы:

– загрузка и предварительная обработка данных, включающую проверку наличия целевого столбца и на пропуски,

– разделение данных на обучающие и тестовые выборки;

– построение базовой модели случайного леса и оценка её точности;

– анализ важности признаков, содержащую построение графика важности и отбор топ-10 наиболее информативных характеристик;

– фильтрация данных по отобранным признакам и повторное разделение на обучающую и тестовую выборку;

– обучение новой модели на сокращённом наборе признаков;

– оценка точности финальной модели.

На рис. 2 показан фрагмент кода отбора признаков для классификации причалов.

```
rf_model = RandomForestClassifier(n_estimators=100, random_state=42)
rf_model.fit(X_train, y_train)
y_pred = rf_model.predict(X_test)
accuracy = accuracy_score(y_test, y_pred)
print(f'Точность модели: {accuracy:.2f}')
feature_importance = pd.Series(
    rf_model.feature_importances_,
        # БЫЛО: feature_importances_ → ПРАВИЛЬНО: feature_importances_
    index=X.columns
).sort_values(ascending=False)
```

Рис. 2. Фрагмент кода отбора признаков для классификации причалов

На рис. 3 показан результат отбора десяти признаков классификации портовых сооружений по показателю важности. А на рис. 4 приведена полученная таблица исходных данных для многопараметрической классификации причальных сооружений.

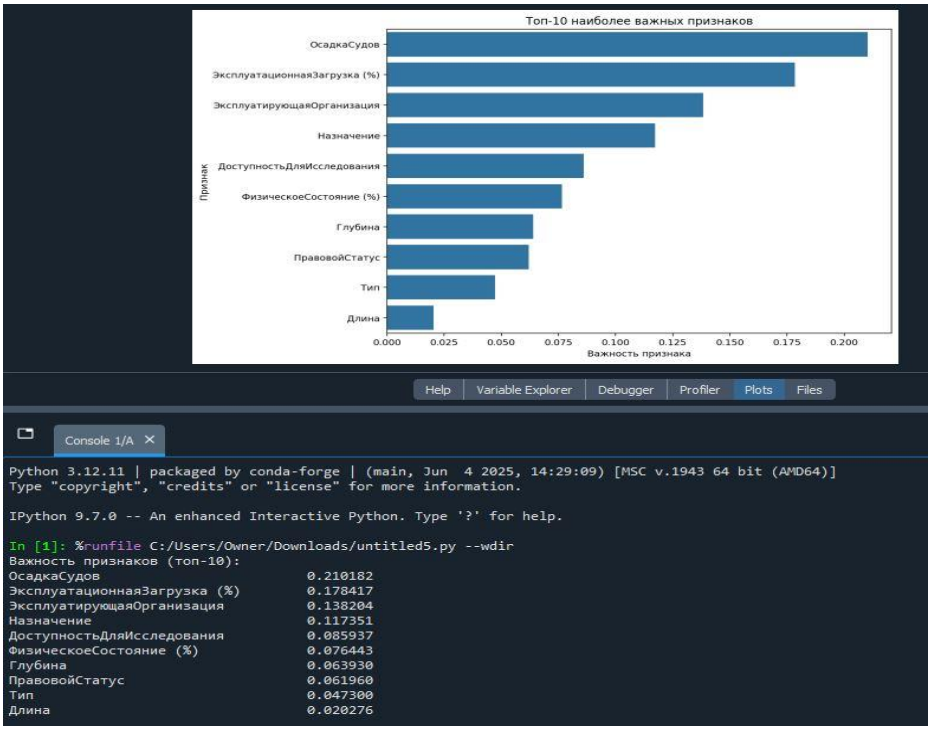


Рис. 3. Результат отбора десяти признаков классификации причальных сооружений

НомерПричала	Тип	Назначение	Длина	Глубина	ОсадкаСудов	ФизическоеСостояние (%)	ПравовойСтатус	ЭксплуатационнаяЗагрузка (%)	ДоступностьДляИсследования	ЭксплуатирующаяОрганизац
1	восточный пирс	1	131,3	5,5	5,2	20	1	50	0	ОАО "НМТП"
2	восточный пирс	2	141,5	9,7	9,4	60	1	100	0	ОАО "НМТП"
3	восточный пирс	2	222,6	11,5	11,2	90	1	0	0	ОАО "НМТП"
4	восточный пирс	2	155,2	11,5	11,2	70	1	10	0	ОАО "НМТП"
5	восточный пирс	2	243,5	13	14,7	86	1	10	0	ОАО "НМТП"
6	восточный пирс	2	160,7	9,7	9,4	25	1	100	0	ОАО "НМТП"
7	широкий пирс 2	2	165	8,3	8	10	1	100	0	ОАО "НМТП"
7а	широкий пирс 2	1	134	4,5	4,2	10	1	100	0	ОАО "НМТП"
7б	широкий пирс 2	1	258,5	3,5	3,2	10	1	100	0	ОАО "НМТП"
8	широкий пирс 2	3	186,9	11,5	11,2	6	1	100	0	ОАО "НМТП"
9	широкий пирс 2	4	239,7	11,5	11,2	7	1	100	0	ОАО "НМТП"
10	широкий пирс 2	2	182,8	11,5	11,2	7	1	100	0	ОАО "НМТП"
11	широкий пирс 2	2	198	11,5	11,2	6	1	100	0	ОАО "НМТП"
12	широкий пирс 2	2	180,8	10,5	10,2	7	1	100	0	ОАО "НМТП"
13	широкий пирс 2	2	155	8,3	8	8	1	100	0	ОАО "НМТП"
14	широкий пирс 1	5	167,9	8,3	8	6	1	100	0	ОАО "НМТП"
15	широкий пирс 1	6	297	8,3	8	7	1	100	0	ОАО "НМТП"
16	широкий пирс 1	2	177,8	11,5	11,2	8	1	100	0	ОАО "НМТП"
17	широкий пирс 1	2	239,5	11,5	11,2	7	1	100	0	ОАО "НМТП"
18	широкий пирс 1	2	182,5	11,5	11,2	6	1	100	0	ОАО "НМТП"
19	широкий пирс 1	6	181	11,5	11,2	5	1	100	0	ОАО "НМТП"
20	широкий пирс 1	2	153,4	9,8	9,5	4	1	100	0	ОАО "НМТП"
21	пристань 3	2	155	7,3	7	3	1	100	1	ОАО "НМТП"
22	пристань 3	6	268,3	13,5	13,2	6	1	100	1	ОАО "НЗТ"
23	пристань 3	6	258	13,5	13,2	7	1	100	0	ОАО "НЗТ"
24	пристань 3	6	144	13,5	13,2	9	1	100	0	ОАО "НЗТ"
25	пристань 4	7	227	11,5	10,4	8	1	100	0	ОАО "НМТП"
25а	пристань 4	7	66,5	3,9	3,6	8	1	100	0	ОАО "НМТП"
26	пристань 5	8	250	13,2	12,9	7	1	100	0	ОАО "ИПП" (ОАО "НМТП")
26а	пристань 5	2	100	5	4,7	8	1	100	0	ОАО "ИПП" (ОАО "НМТП")
27	пристань 5	8	250	12,2	11,9	80	1	40	0	ОАО "ИПП" (ОАО "НМТП")
28	лесной пирс	2	162	9,6	9,3	30	1	60	0	ОАО "Новорослесэкспорт"
28а	лесной пирс	2	100	8,2	8	30	1	60	0	ОАО "Новорослесэкспорт"
29	лесной пирс	2	182	13,9	13	30	1	60	0	ОАО "Новорослесэкспорт"

Рис. 4. Исходные данные для многопараметрической классификации

Блок 2 ГИС–модуля выполняет непосредственную классификацию причальных сооружений применяется методом k-ближайших соседей. В качестве метрики расстояния используется евклидово расстояние в многомерном пространстве признаков:

$$d_e(O_i, O_j) = \sqrt{\sum_{x=1}^{M} (O_i^{(x)} - O_j^{(x)})^2}. \quad (3)$$

Выбор оптимального значения параметра k осуществляется на основе кросс-валидации – перебираются значения k, и для каждого значения оценивается точность классификации на валидационной выборке. Оптимальным считается значение k, обеспечивающее максимальную точность.

На рис. 5 показан фрагмент кода классификации причалов.

```
def assign_class(score):
    if score < 20: return 'Класс E'
    elif 20 <= score < 30: return 'Класс D'
    elif 30 <= score < 40: return 'Класс C'
    elif 40 <= score < 50: return 'Класс B'
    else: return 'Класс A'
df['Класс'] = df['Баллы'].apply(assign_class)
feature_cols = ['Длина', 'Глубина', 'ОсадкаСудов',
'ФизическоеСостояние (%)', 'ЭксплуатационнаяЗа-грузка (%)']
X = df[feature_cols].values
y = df['Класс'].values
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y,
 test_size=0.3, random_state=42, stratify=y)
knn = KNeighborsClassifier(n_neighbors=3)
knn.fit(X_train, y_train)
df['Предсказанный класс'] = knn.predict(X)
print("Отчёт о классификации (KNN):")
print(classification_report(y_test, knn.predict(X_test)))
cols_order = ['Тип', 'ЭксплуатирующаяОрганизация', 'НомерПричала',
 'Баллы', 'Класс', 'Предсказан-ный класс']
result = df[cols_order].copy()
result = result.sort_values(by=['ЭксплуатирующаяОрганизация',
 'Тип', 'НомерПричала'])
```

Рис. 5. Фрагмент кода классификации причалов

Визуализация и вывод результата классификации причалов с применением метода k-ближайших соседей показаны на рис. 6 и рис. 7.

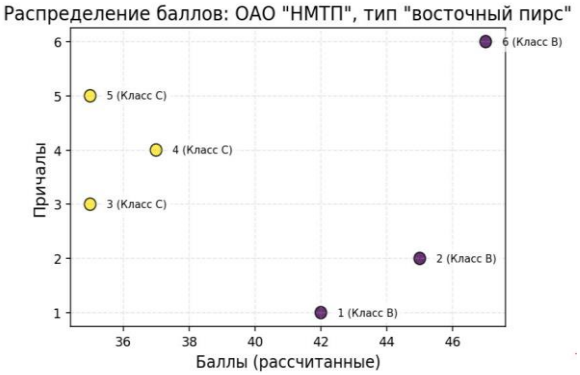


Рис. 6. Визуализация результата классификации причалов

Тип	ЭксплуатирующаяОрганизация	НомерПричала	Баллы	Класс	Предсказанный класс
Причалы ОАО "Стройкомплект"	АО Зерновой Терминал "КСК"	1	41	Класс B	Класс B
Причалы ОАО "Стройкомплект"		2	41	Класс B	Класс B
		3	45	Класс B	Класс B
		4	39	Класс C	Класс B
		5	45	Класс B	Класс B
		6	45	Класс B	Класс B
		7	47	Класс B	Класс B
		4а	37	Класс C	Класс B
ЮВГР		41	47	Класс B	Класс B
		42	47	Класс B	Класс B
пристань 5	ОАО "ИПП" (ОАО "НМТП")	26	51	Класс A	Класс A
пристань 5		27	39	Класс C	Класс C
		26а	47	Класс B	Класс B
пристань 3	ОАО "НЗТ"	22	54	Класс A	Класс A
пристань 3		23	51	Класс A	Класс A
		24	49	Класс B	Класс B
восточный пирс	ОАО "НМТП"	1	42	Класс B	Класс B
восточный пирс		2	45	Класс B	Класс B
		3	35	Класс C	Класс C
		4	37	Класс C	Класс C
		5	35	Класс C	Класс C
		6	47	Класс B	Класс B
		21	52	Класс A	Класс B
пристань 4		25	51	Класс A	Класс A
		25а	41	Класс B	Класс B
широкий пирс 1		14	47	Класс B	Класс B
		15	49	Класс B	Класс B
		16	51	Класс A	Класс B
		17	53	Класс A	Класс A
		18	51	Класс A	Класс B
		19	49	Класс B	Класс B
		20	49	Класс B	Класс B

Рис. 7. Результат классификации причалов

Блок 3 разработанного ГИС-модуля выполняет функцию настройки рабочего пространства ArcGIS Pro для визуального отображения результатов классификации морских причальных сооружений в виде тематической карты акватории и прилегающей территории морского порта Новороссийск, на основе векторного слоя, содержащего пространственные объекты – причальные сооружения. Каждому объекту слоя присвоены атрибутивные данные, включающие исходные характеристики (десять признаков), рассчитанный интегральный балл, экспертную категорию и предсказанный алгоритмом k-NN класс (см. рис. 8).

Карта является финальным результатом работы ГИС-модуля и предназначена для визуального анализа распределения причалов по категориям, выявления пространственных закономерностей и поддержки принятия управленческих решений.

На рис. 8 причальные сооружения были отображены с цветовой дифференциацией в соответствии с предсказанной категорией:

- класс A (критически важен, состояние хорошее, документы в порядке) – оранжевый цвет;
- класс B (важен, износ 30–50%, плановый ремонт) – светло-зелёный цвет;
- класс C (вспомогательный, износ 50–70%, наблюдение) – жёлтый цвет.

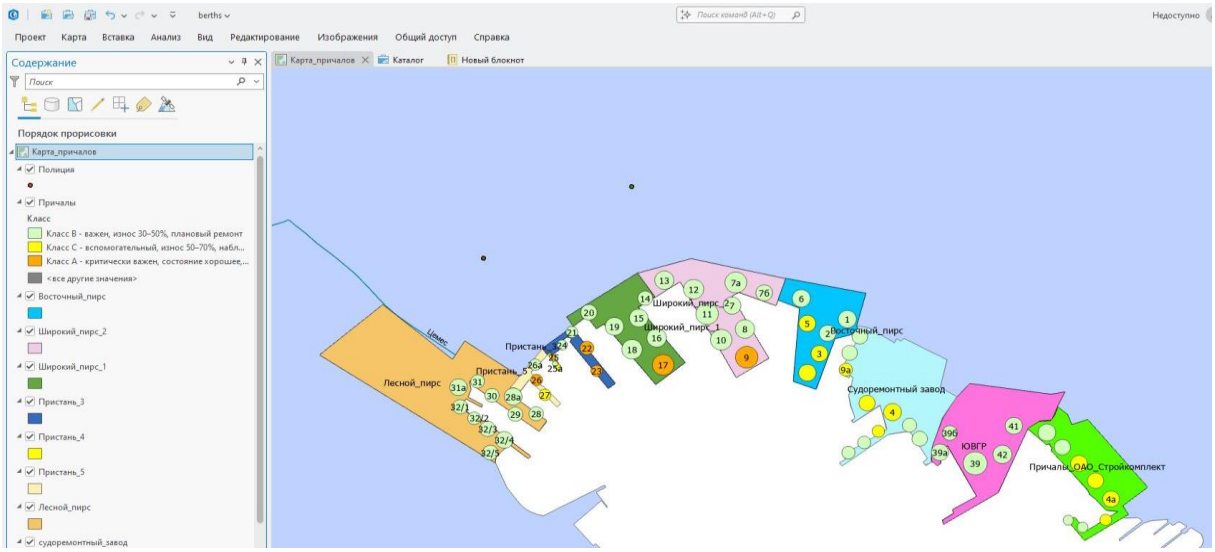


Рис. 8. Тематическая карта морского порта Новороссийск с результатами классификации причалов

Карта реализована в формате интерактивного проекта ArcGIS Pro, что обеспечивает возможность отображать всплывающие окна (Pop-ups) с подробной карточкой объекта при нажатии курсором

на любой причал, как это показано ни рис. 9. Кроме этого, поддерживается возможность фильтрации объектов карты, т.е. отображение только причалов определённого класса для анализа пространственного распределения конкретной категории.

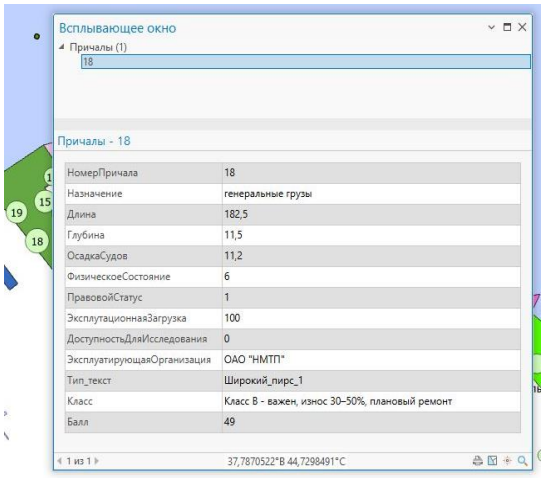


Рис. 9. Всплывающее окно, отображающее признаки и класс причала

Метод k-ближайших соседей с оптимальным значением параметра k=5 продемонстрировал следующие результаты на тестовой выборке:

– точность (Accuracy): 86,7%;

– полнота (Recall): в диапазоне 82–91% для различных классов;

– F1-score: 85,2% (средневзвешенное).

Матрица ошибок показала, что наиболее часто путаются категории А и В – что объясняется наличием причалов, которые по своим характеристикам могут быть отнесены к обеим категориям (например, причалы для зерновых грузов, которые являются критически важными, но также могут и нуждаться в ремонте).

Заключение

Таким образом, в работе разработана и реализована архитектура ГИС-модуля многопараметрической классификации морских причальных сооружений, включающая этапы сбора и хранения данных, извлечения признаков, предварительной обработки, отбора значимых признаков, классификации и визуализации результатов.

Обоснован выбор десяти значимых признаков для классификации причальных сооружений, что обеспечило сохранение точности классификации на уровне не менее 90% от базовой модели, построенной на полном наборе признаков, что в свою очередь подтверждает эффективность использованного подхода.

В качестве алгоритмов машинного обучения использованы метод случайного леса для отбора наиболее информативных признаков по критерию Джини и метод k-ближайших соседей для непосредственной классификации. Апробация на данных порта Новороссийск показала точность классификации на уровне 86,7%.

Разработанная архитектура ГИС-модуля по сравнению с традиционными подходами к классификации пространственных объектов позволяет выполнять обработку исходных данных в едином конвейере обработки, а также результаты классификации непосредственно отображаются на карте, что обеспечивает их наглядность и доступность для принятия управленческих решений;

Статистическая значимость полученных результатов может быть увеличена расширением выборки причальных сооружений и включение других портов.

Литература

1. Панамарева, О. Н. Обоснование целесообразности внедрения ГИС и ее интеграции с экономическими системами морских транспортных предприятий // Общество: политика, экономика, право. 2012. №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-tselesoobraznosti-vnedreniya-gis-i-ee-integratsii-s-ekonomicheskimi-sistemami-morskih-transportnyh-predpriyatiy (дата обращения: 03.07.2026).
2. Оценка эффективности способов защиты телекоммуникационного оборудования систем 4G LTE в морских портах / Ю. В. Редькин, С. И. Кондратьев, И. И. Бузенков, С. Крстич // Эксплуатация морского транспорта. – 2025. – № 3(116). – С. 115-125.
3. Халеева, Е. П. Цифровые тренды на морском транспорте / Е. П. Халеева, Н. Ю. Росторгуева, М. Н. Лютикова // Наука XXI века: технологии, управление, безопасность: Материалы III Национальной научной конференции, Курган, 13 мая 2024 года. – Курган: Курганский государственный университет, 2024. – С. 114-119.
4. Чернова, А. И. Геоинформационная система мониторинга технического состояния пространственно-распределенных объектов морских телекоммуникационных сетей / А. И. Чернова, Н. В. Старжинская, А. А. Березкина // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Геоинформационные платформы военного назначения»: Сборник статей I Всероссийской научно-технической конференции, Анапа, 17 марта 2021 года. – Анапа: Федеральное государственное автономное учреждение "Военный инновационный технополис "ЭРА", 2021. – С. 124-130.
5. Грибков, А. А. Совершенствование классификации объектов в теории систем / А.А. Грибков // Вестник Московского государственного областного университета. – 2022. – №1 (2023). – С. 1-10.
6. Чернова, А. И. Математическое моделирование многопараметрической диагностики технического состояния пространственно-распределенных объектов морских информационных систем / А. И. Чернова, Н. В. Старжинская // Эксплуатация морского транспорта. – 2021. – № 3(100). – С. 155-160. – DOI 10.34046/aumsuomt100/22. – EDN BGGDSE.
7. Миронова, Ю. Н. О классификациях геоинформационных объектов / Ю. Н. Миронова // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2017. – № 3-3. – С. 71-74.

8. Automate Network Analyst workflows // ArcGIS Pro Documentation. – URL: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/networks/automating-workflows.htm (дата обращения: 12.07.2026).
9. Ильичев, В. Ю. Использование вычислительного метода k ближайших соседей для кластеризации технических объектов / В. Ю. Ильичев, М. С. Ганков // Вопросы науки. – 2024. – № 1. – С. 41-46.
10. Integrating Port Planning Information into a Web-Based Geographic Information System Platform // Ports 2025: Port Planning and Development. – Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2025. – P. 380-392.
11. Майоров, А. А. Сравнительный анализ технологий локальной оптимизации программ на языке PyThon в задачах обработки пространственных данных / А. А. Майоров, О. Г. Гвоздев // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 5. – С. 61-69.

References

1. Panamareva, O. N. Obosnovanie celesoobraznosti vnedreniya GIS i ee integracii s ekonomicheskimi sistemami morskih transportnyh predpriyatij [Justification for the Feasibility of Implementing a GIS and Integrating It with the Economic Systems of Maritime Transport Enterprises]// Obshchestvo: politika, ekonomika, pravo. 2012. №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-tselesoobraznosti-vnedreniya-gis-i-ee-integratsii-s-ekonomicheskimi-sistemami-morskih-transportnyh-predpriyatiy (data obrashcheniya: 03.07.2026).
2. Ocenka effektivnosti sposobov zashchity telekommunikacionnogo oborudovaniya sistem 4G LTE v morskih portah [Evaluation of the Effectiveness of Protection Methods for 4G LTE Telecommunications Equipment in Seaports] / YU. V. Red'kin, S. I. Kondrat'ev, I. I. Buzenkov, S. Krstich // Ekspluataciya morskogo transporta. 2025. № 3(116). S. 115-125.
3. Haleeva, E. P. Cifrovye trendy na morskom transporte [Digital trends in maritime transport] / E. P. Haleeva, N. YU. Rostorgueva, M. N. Lyutikova // Nauka XXI veka: tekhnologii, upravlenie, bezopasnost' : Materialy III Nacional'noj nauchnoj konferencii, Kurgan, 13 maya 2024 goda. Kurgan: Kurganskij gosudarstvennyj universitet, 2024. S. 114-119.
4. CHernova, A. I. Geoinformacionnaya sistema monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya prostranstvenno-raspredelennyh ob"ektov morskih telekommunikacionnyh setej [Geoinformation system for monitoring the technical condition of spatially distributed assets in marine telecommunication networks]/ A. I. CHernova, N. V. Starzhinskaya, A. A. Berezkina // Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremennoj nauki po napravleniyu «Geoinformacionnye platformy voennogo naznacheniya»: Sbornik statej I Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii, Anapa, 17 marta 2021 goda. Anapa: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe uchrezhdenie "Voennyj innovacionnyj tekhnopolis "ERA", 2021. S. 124-130.
5. Gribkov, A. A. Sovershenstvovanie klassifikacii ob"ektov v teorii system [Refining the Classification of Objects in Systems Theory] / A.A. Gribkov // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. 2022. №1 (2023). S. 1-10.
6. CHernova, A. I. Matematicheskoe modelirovanie mnogoparametricheskoj diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya prostranstvenno-raspredelennyh ob"ektov morskih informacionnyh sistem [Mathematical modeling of multi-parameter diagnostics of the technical condition of spatially distributed objects in marine information systems]/ A. I. CHernova, N. V. Starzhinskaya // Ekspluataciya morskogo transporta. 2021. № 3(100). S. 155-160.
7. Mironova, YU. N. O klassifikaciyah geoinformacionnyh ob"ektov [On the Classifications of Geoinformation Objects]/ YU. N. Mironova // Aktual'nye problemy gumanitarnyh i estestvennyh nauk. 2017. № 3-3. S. 71-74.
8. Automate Network Analyst workflows // ArcGIS Pro Documentation. – URL: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/networks/automating-workflows.htm (data obrashcheniya: 12.07.2026).
9. Il'ichev, V. YU. Ispol'zovanie vychislitel'nogo metoda k blizhajshih sosedej dlya klasterizacii tekhnicheskih ob"ektov [Application of the k-nearest neighbors computational method for clustering technical objects]/ V. YU. Il'ichev, M. S. Gankov // Voprosy nauki. 2024. № 1. S. 41-46.
10. Integrating Port Planning Information into a Web-Based Geographic Information System Platform // Ports 2025: Port Planning and Development. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2025. S. 380-392.
11. Majorov, A. A. sravnitel'nyj analiz tekhnologij lokal'noj optimizacii programm na yazyke PyThon v zadachah obrabotki prostranstvennyh dannyh [Comparative analysis of local optimization technologies for Python programs in spatial data processing tasks] / A. A. Majorov, O. G. Gvozdev // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Geodeziya i aerofotos"emka. 2014. № 5. S. 61-69.

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

Бойко Анна Ивановна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: ruzhay_ann@mail.ru

Гончаренко Софья Геннадьевна, магистрант кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: sony.goncharenko@yandex.ru

Anna I. Boyko, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Radio Electronics and Information Technology, Admiral Ushakov Maritime University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, e-mail: ruzhay_ann@mail.ru

Sofia G. Goncharenko, master's student of the Department of Radio Electronics and Information Technology, Admiral Ushakov Maritime University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, e-mail: sony.goncharenko@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.08.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 13.08.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 14.08.2026.

Научная статья
УДК 629:004.942:519.876
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.068

Моделирование динамики безэкипажных судов с использованием модифицированного фильтра Маджвика

Данцевич И.М.[1] dantsevich.aumsu@gmail.com, **Зеленков Г.А.**[1] mathshell@mail.ru,
Томилин А.Н.[1] tomilin.sania2012@yandex.ru, **Лютикова М.Н.**[1] mnlyutikova@mail.ru
[1]Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В статье предложен модифицированный алгоритм фильтра Маджвика, позволяющий устранять погрешности влияния судна на опорные измерения магнитного поля Земли системой девятиосевых сенсоров, включающих трёхосевые магнитометры, трёхосевые гироскопы и трёхосевые акселерометры. Опорный сигнал корректуры от геоинформационной навигационной системы позволяет построить корректирующий вектор положения в измерениях магнитного поля Земли магнитометром, собранным на единой подложке вместе с гироскопом и акселерометром. Это обстоятельство позволяет компенсировать дрейф характеристик за счёт усреднения измерений девятиосевого сенсора. Связь измерений положения судна сенсорами с системой отображения динамики и системой управления обеспечивается через систему корабельных углов С.Н. Благовещенского, пересчитанных с использованием алгебры кватернионов. Определение положения магнитного полюса Земли при вычислении динамики судна трёхосевым магнитометром не является однозначным, поэтому возникает необходимость корректировки счислений, соответствующих положению центра масс судна относительно магнитного поля Земли в течение некоторого времени. Выполнение этих условий требует неподвижности магнитометра для его калибровки, что в условиях волнения выполнить невозможно. Компенсировать дрейф характеристик трёхосевого магнитометра можно введением корректирующего поворота кватерниона, построенного по измерениям магнитометра с поправкой на истинный курс судна. Варианты динамики судна представлены в алгебре кватернионов по разным направлениям вращения (преобразования координат). Модифицированный алгоритм фильтра Маджвика построен на основе вывода целевой функции компенсации дрейфа характеристик по Крэйгу. Указанный подход предусматривает построение некоторой, в рассматриваемом методе линейной, функции преобразования частоты. Разработанный метод может применяться для построения алгоритмов идентификации системы управления безэкипажными судами в различных условиях.
Ключевые слова: бескарданные инерционные навигационные системы, динамика безэкипажных судов, компенсация дрейфа характеристик, кватернионы, девятиосевые сенсоры, трёхосевые магнитометры, трёхосевые гироскопы, трёхосевые акселерометры, модифицированный фильтр Маджвика, микроэлектромеханические сенсоры.
Для цитирования: Данцевич И.М., Зеленков Г.А., Томилин А.Н., Лютикова М.Н. Моделирование динамики безэкипажных судов с использованием модифицированного фильтра Маджвика. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 1, С. 375—387. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.068

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.068

Simulation of the dynamics of unmanned vessels using modified Majvik filter

Igor M. Dantsevich[1] dantsevich.aumsu@gmail.com, **Gennady A. Zelenkov**[1] mathshell@mail.ru,
Alexandr N. Tomilin[1] tomilin.sania2012@yandex.ru, **Marina N. Lyutikova**[1] mnlyutikova@mail.ru
[1]Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. The article proposes a modified algorithm of the Majvik filter, which eliminates the ship's influence error on the Earth's magnetic field support measurements by a system of nine-axis sensors including three-axis magnetometers, three-axis gyroscopes and three-axis accelerometers. The correction reference signal from the geo-information navigation system makes it possible to construct a position corrector vector in the measurements of the magnetic field of the Earth by magnetometer, assembled on a single substrate, together with gyroscope and accelerometer. This makes it possible to compensate for the drift of characteristics by averaging the measurements of a nine-axis sensor. The connection of the ship's position sensors with the dynamic display system and the control system is provided by the system of ship angles S.N. Blagoveshchensky recalculated through the algebra of quaternions. Determining the position of the magnetic pole of the Earth when calculating the ship's dynamics with the triaxial magnetometer is not unique, so there is a need to adjust the counts corresponding to the position of the center of mass of the ship relative to the magnetic field of the Earth for some time. These conditions require the magnetometer to be immobile for its calibration, which is impossible in conditions of turbulence. It is possible to compensate for the drift of the characteristics of the triaxial magnetometer by introducing a corrective direction of the quarternion of the constructed according to the measurements with a magnetometer corrected for the true course of the vessel. Variants of the dynamics of the ship are presented in the algebra of quaternions in different directions of rotation (coordinate conversion). The modified

© Данцевич И.М., Зеленков Г.А., Томилин А.Н., Лютикова М.Н. 2026

Majvik filter algorithm is built on the output of a target function to compensate for Craig's drift. This approach involves constructing some, in the present method of linear, frequency conversion functions. The developed method can be used to build identification algorithms for unmanned control system in various conditions.
Keywords: gimbal-free inertial navigation systems, dynamics of unmanned vessels, drift compensation, quaternions, nine-axis sensors, three-axis magnetometers, three-axis gyroscopes, three-axis accelerometers, modified Madgwick filter, microelectromechanical sensors.
For citation: Igor M. Dantsevich, Gennady A. Zelenkov, Alexandr N. Tomilin, Marina N. Lyutikova. Simulation of the dynamics of unmanned vessels using modified Majvik filter. Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 1, P. 375—387. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.068

Введение

Решение задач вычисления динамики безэкипажного судна сопровождается значительными объёмами вычислительных операций. Волнение моря как возмущающий фактор среды в задачах динамики рассматривается с позиций спектрального анализа, подчиняющегося статистическому описанию.

Динамика судна рассчитывается в первом и втором приближениях по функциям, разложенным в степенные или ряды Фурье [1]. Основным вопросом вычислительных алгоритмов для безэкипажного судовождения является получение траекторных расчётов в условиях волнового воздействия [2–3]. Компенсация ошибок управления судном, вызываемых волнением, требует выполнения расчётов в реальном масштабе времени. Учёт отклонения курса судна вследствие воздействия волн, ветра и зыби, направления которых могут не совпадать, должен обеспечивать оперативную компенсацию негативных влияний возмущений.

В работе [2] предполагается расчёт равновес-ных состояний судна, при этом отображение динамики производится на основе кинематических моделей относительно равновесного состояния. Кинематические модели содержат параметры, описывающие вращение вектора, проведённого из центра тяжести судна. Полученные соотношения связывают кинематику судна с географическими координатами, благодаря чему удаётся добиться компенсации ошибок курса при следовании в заданном направлении движения.

В работе [3], авторами исследованы динамика и кинематика судна в условиях критических значений качки при штормовой погоде. Модель качки включает вычисление моментов инерции и определение значений критических углов наклонения судна. Результаты моделирования представлены в виде 3D-анимации, выполненной с применением технологий компьютерного видео. В основе анимационного видео лежат преобразования углов Эйлера в различных системах координат, системы дифференциальных уравнений кинематических моделей, а также моделирование волнения моря.

В работе [4] рассмотрены вопросы формирования фронта ураганов и штормов для последующего применения при моделировании динамики судов в штормовых условиях. В результате моделирования с 95% достоверностью определены условия развития штормовой погоды, на примере урагана «Мэтью» (октябрь 2018 года). Применённая методология машинного обучения рассматривается в приложениях, связанных с моделированием рисков навигации в условиях штормовой погоды.

Вопросам безопасности и динамики движения беспилотных судов посвящено множество научных публикаций, например [5-6; 9-15].

В современных интерфейсах управления безэкипажными судами наибольший интерес представляют модели преобразования координат, которые позволяют с высокой точностью и минимальными вычислительными затратами реализовать воспроизведение динамики судна в компьютерных визуализациях. Функциональные возможности современных графических комплексов существенно расширяются благодаря интеграции сервисов подключения электронных навигационных карт.

Использование современных вычислительных систем в автоматизированных системах управления судовождением, основанных на применении различных систем координат с отображением динамики в углах Эйлера, требует выполнения не менее двенадцати операций вращения и хранения соответствующих вычисленных значений углов в табличных данных для управления.

Выполнить укрупнение вычислительных операций, с использованием заданных преобразований можно с использованием алгебры кватернионов. Использование указанного подхода позволяет сократить число операций умножений с накоплением, что существенно сокращает время вычислительных операций. Применение вычисленных дискретных значений кватернионов, позволяет рассматривать операции вращения вектора центра тяжести среди двенадцати вариаций поворотов. Использование углов Эйлера потребует к этим двенадцати операциям, вычислений поворотов комбинаций углов Эйлера, которые представляет собой матричный оператор размером 3x3.

В данной работе рассмотрены алгоритмы вычисления динамики движения безэкипажного судна в алгебре кватернионов. При этом выполнено преобразование системы корабельных углов по Благовещенскому к операторам определения положения центра тяжести судна с использованием данных, получаемых от девятиосевых сенсоров микроэлектромехани-ческих систем (МЭМС). Для обработки и фильтрации измеренных навигационных параметров применяется фильтр Маджвика, обеспечивающий повышение точности аппроксимации ориентации и динамических характеристик судна.

Методы и материалы

При описании динамики подвижных объектов принято принято использовать геоцентрическую инерциальную систему координат, начало которой находится имеет в центре масс Земли. Относительно неё определяют систему координат судна.

Система координат судна (СКС), с центром O системы и её координатные оси X, Y, Z жёстко связаны с самим объектом. В этой системе задаются положение и ориентация установленных на транспортном средстве инерциальных блоков и антенн приёмников ГЛОНАСС/GPS.

Система эйлеровых (корабельных) углов Благовещенского С.Н. [1], рассматривает три системы координат – одна неподвижная и две подвижные. Любая динамика суда описывается вращением осей $Oxyz$ относительно системы координат $G\xi\zeta\eta$, как показано на рисунке 1.

Неподвижная система координат $O_1\xi_1\zeta_1\eta_1$ на рисунке совмещена с первой подвижной $O\xi\zeta\eta$. Вторая подвижная система координат связана с судном, и её центр координат совпадает с центром тяжести судна G.

Применение кватернионов к вычислениям центра тяжести судна оправдано, в том числе, реализацией операции цифровой фильтрации. Для этих целей чаще всего применяют фильтры Калмана, Мохони, Маджвика [7-8]. Использование бескарданных инерциальных навигационных систем (БИНС) на основе современных микроэлектромеханических систем (МЭМС), комплексированных с микропроцессорными системами в единых модулях, предполагает применение алгебры кватернионов, позволяющей уменьшить объём вычислений.

Известные формулы перехода от неподвижной к первой подвижной системе координат [1]:

$$\xi_1 = (\xi + vt)\cos\varepsilon - \eta\sin\varepsilon; \quad (1)$$

$$\eta_1 = \eta\cos\varepsilon + (\xi + vt)\sin\varepsilon; \quad (2)$$

$$\zeta_1 = \zeta; \quad (3)$$

и перехода от второй подвижной к первой:

$$\xi = \xi_g + a_1x + b_1y + c_1z; \quad (4)$$

$$\eta = \eta_g + a_2x + b_2y + c_2z; \quad (5)$$

$$\zeta = \zeta_g + a_3x + b_3y + c_3z; \quad (6)$$

где v – значение скорости при прямолинейном поступательном движении судна, $a_1 \dots, b_1 \dots, c_3 \dots$ – направляющие косинусы, выражаемые чрез углы Эйлера, ε – угол между проекциями $O\xi$ и $O_1\xi_1$, t – время, выборка которого соответствует времени совмещения полюсов O и O_1.

Пересчёт координат в системе, приведенной на рисунке 1 [23]:

$$\begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos\theta & -sin\theta \\ 0 & sin\theta & cos\theta \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{vmatrix}, \quad (7)$$

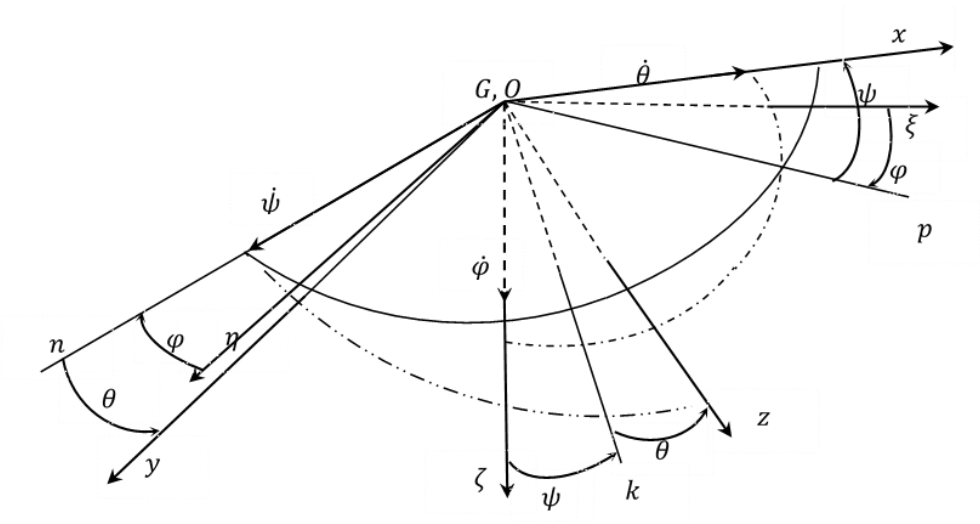


Рис.1. Отображение динамики судна в неподвижной (геостационарной системе) координат и связанной с судном (подвижной) системе координат по системе корабельных углов Благовещенского С.Н.

$$\begin{vmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} cos\varphi & 0 & sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -sin\varphi & 0 & cos\varphi \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} p \\ k \\ n \end{vmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{vmatrix} p \\ k \\ n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} cos\psi & -sin\psi & 0 \\ sin\psi & cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Для варианта преобразования матрицы M – поворот вида:

$1. M = M\big(X(\theta), Y(\varphi), Z(\psi)\big) = XYZ$:

$$M = \begin{vmatrix} \cos\varphi\cos\psi & -\cos\varphi\sin\psi & \sin\varphi \\ \sin\theta\sin\varphi\cos\psi + \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta\sin\varphi\sin\psi + \cos\theta\cos\psi & -\sin\theta\cos\varphi \\ -\cos\theta\sin\varphi\cos\psi + \sin\theta\sin\psi & \cos\theta\sin\varphi\sin\psi + \sin\theta\cos\psi & \cos\theta\cos\varphi \end{vmatrix}, \quad (10)$$

запишем кватернионы:

$$q_1 = -sin^{\frac{1}{2}}\theta\, sin^{\frac{1}{2}}\varphi\, sin^{\frac{1}{2}}\psi + cos^{\frac{1}{2}}\theta\, cos^{\frac{1}{2}}\varphi\, cos^{\frac{1}{2}}\psi, \quad (11)$$

$$q_2 = sin^{\frac{1}{2}}\theta\, cos^{\frac{1}{2}}\varphi\, cos^{\frac{1}{2}}\psi + sin^{\frac{1}{2}}\varphi\, sin^{\frac{1}{2}}\psi\, cos^{\frac{1}{2}}\theta, \quad (12)$$

$$q_3 = -sin^{\frac{1}{2}}\theta\, sin^{\frac{1}{2}}\psi\, cos^{\frac{1}{2}}\varphi + sin^{\frac{1}{2}}\varphi\, cos^{\frac{1}{2}}\theta\, cos^{\frac{1}{2}}\psi, \quad (13)$$

$$q_4 = sin^{\frac{1}{2}}\theta\, sin^{\frac{1}{2}}\varphi\, cos^{\frac{1}{2}}\psi + sin^{\frac{1}{2}}\psi\, cos^{\frac{1}{2}}\theta\, cos^{\frac{1}{2}}\varphi, \quad (14)$$

где $\theta = tan^{-1}\left(\frac{-m_{23}}{m_{33}}\right)$, (15)

$$\varphi = tan^{-1}\left(\frac{m_{13}}{\sqrt{1-m_{13}^2}}\right), \quad (16)$$

$$\psi = tan^{-1}\left(\frac{-m_{12}}{m_{11}}\right). \quad (17)$$

А, например, для варианта преобразования матрицы M – поворот вида:

2. $M = M\big(X(\theta), Z(\varphi), Y(\psi)\big) = XZY$:

$$M = \begin{vmatrix} cos\varphi cos\psi & -sin\varphi & cos\varphi sin\psi \\ cos\theta\, sin\,\varphi\, cos\,\psi + sin\,\theta\, sin\,\psi & cos\,\theta\, cos\,\varphi & cos\theta\, sin\,\varphi\, sin\,\psi - sin\,\theta\, cos\,\psi \\ sin\theta\, sin\,\varphi\, cos\,\psi - cos\,\theta\, sin\,\psi & sin\,\theta\, cos\,\varphi & sin\theta\, sin\,\varphi\, sin\,\psi + cos\,\theta\, cos\,\psi \end{vmatrix}, \quad (18)$$

кватернионы будут иметь вид:

$$q_1 = sin^{\frac{1}{2}}\theta\, sin^{\frac{1}{2}}\varphi\, sin^{\frac{1}{2}}\psi + cos^{\frac{1}{2}}\theta\, cos^{\frac{1}{2}}\varphi\, cos^{\frac{1}{2}}\psi, \quad (19)$$

$$q_2 = sin^{\frac{1}{2}}\theta\, cos^{\frac{1}{2}}\varphi\, cos^{\frac{1}{2}}\psi - sin^{\frac{1}{2}}\varphi\, sin^{\frac{1}{2}}\psi\, cos^{\frac{1}{2}}\theta, \quad (20)$$

$$q_3 = -sin^{\frac{1}{2}}\theta\, sin^{\frac{1}{2}}\psi\, cos^{\frac{1}{2}}\varphi + sin^{\frac{1}{2}}\psi\, cos^{\frac{1}{2}}\theta\, cos^{\frac{1}{2}}\varphi, \quad (21)$$

$$q_4 = sin^{\frac{1}{2}}\theta\, sin^{\frac{1}{2}}\psi\, cos^{\frac{1}{2}}\varphi + sin^{\frac{1}{2}}\varphi\, cos^{\frac{1}{2}}\theta\, cos^{\frac{1}{2}}\psi, \quad (22)$$

где $\theta = tan^{-1}\left(\frac{m_{32}}{m_{22}}\right)$, (23)

$$\varphi = tan^{-1}\left(\frac{-m_{12}}{\sqrt{1-m_{12}^2}}\right), \quad (24)$$

$$\psi = tan^{-1}\left(\frac{m_{13}}{m_{11}}\right). \quad (25)$$

Вычисляемая динамика безэкипажного судна обеспечивается применением алгебры кватернионов [10]. В качестве исходных данных используются фазовые параметры – угловые и линейные скорости, а также координаты [11]. Выходными параметрами являются скорректированные значения скоростей и координат. Особенностью применения бескарданных инерционных навигационных систем (БИНС) является использование кватернионов для описания ориентации. Стоит сделать важное замечание, при записи значений углов, измеряемых в динамике, их отображение происходит в формате десятичных чисел. Поэтому, при отображении информации о наблюдаемой динамике необходим пересчёт в градусную и радианную меру, более привычную при описании счислений углов.

Вычисление позиции судна в динамике при ходе на волнении выполняется по измеряемым координатам микроэлектромеханическими системами объединяющие в своей конструкции девятиосевые сенсоры: трёхосевой акселерометр, трёхосевой магнитометр и трёхосевой гироскоп. Современные девятиосевые сенсоры, построенные по технологии МЭМС, обычно объединены в специализированные микросхемы, имеющие в своём составе, в том числе, микропроцессорную систему. Выходы этих микросхем реализуют стандартные интерфейсы типа UART и I^2C. Формат выводимых данных – кватернионы, значения углов Эйлера, отсчёты вращения вектора (рад), линейные ускорения, положение магнитного полюса Земли, а также заголовочные данные. Для выполнения условия точного измерения положения магнитного полюса Земли, без опорного измерения, необходимо условие неподвижности датчика в течение некоторое время и исключить влияние на него магнитных полей от других источников.

Коррекция ошибок измерений и дрейфа нуля характеристик относительно опорного измерения магнитного поля Земли производится в фильтре Маджвика [10]. Цифровой фильтр построен на архитектуре и программной реализации известного фильтра Маджвика, в котором использование магнетометра эффективно нивелирует ошибку дрейфа нуля гироскопа и угловой ориентации по оси рыскания за счёт комплексирования в одной конструкции указанных сенсоров. Компенсация магнитных дисторсий (искажений) и ошибок магнитного склонения вследствие отклонения чувствительного элемента от горизонта корректирует дрейф гироскопа по оси рыскания.

Особенностью способа определения пространственной ориентации является измерение силы тяжести или магнитного поля Земли, которые сами по себе не обеспечивают уникальную ориентацию датчика. Эталонная ориентация достигается формированием опорного (главного) направления, которое совпадает с истинным курсом судна и корректируется по сигналам ГНСС и навигационной системы судна. Для компенсации ошибок БИНС относительно измерений магнитометра (гаусометра), корректура курсового угла обеспечивается от ГНСС и навигационной системы судна. Источником ошибок является само судно и его системы, структурная схема показана на рисунке 2.

Вычисления в фильтре Маджвика выполняются в алгебре кватернионов, пересчёт в сигналы управления системы автоматического управления движительно-рулевого комплекса выполняется в микропроцессорной системе – вычислителе положения судна.

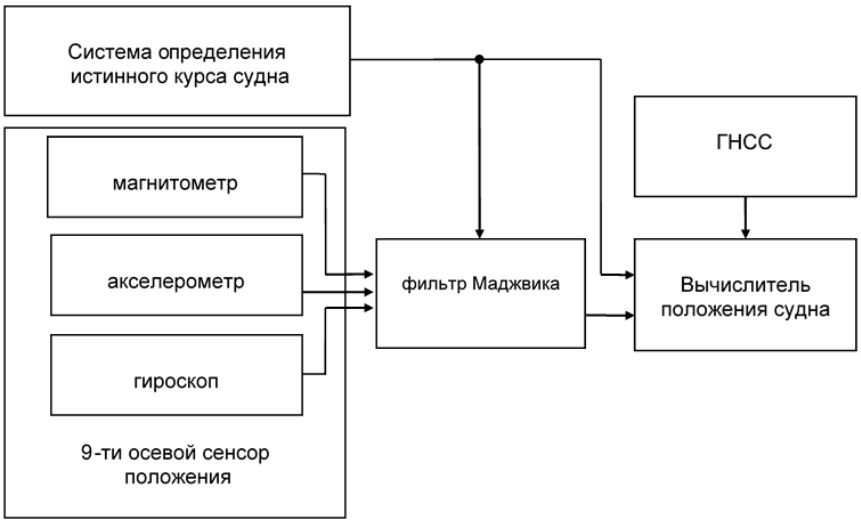


Рис. 2. Структурная схема вычисления динамики судна с использованием 9-ти осевого микроэлектромеханического сенсора

МЭМС – сенсоры (акселерометр, гироскоп, магнитометр) непрерывно измеряют движение, положение и ориентацию в пространстве центра масс судна. Данные с сенсоров и системы определения истинного курса судна, поступают в фильтр Маджвика, где вычисляется нормированное значение кватерниона центра масс судна. Кватернион вращения центра масс судна корректируется в блоке судового вычислителя (по данным получаемым с блока ГНСС и судовой навигационной системы), структурная схема приводится на рисунке 3.

Вычисляемое значение кватерниона, соответствующего положению центра масс судна, по измеренным значениям с магнетометра, акселерометра и гироскопа производятся в модифицированной версии фильтра Маджвика с корректурой магнетометра по истинному курсу судна, чем исключается необходимость реализации условия неподвижности магнетометра для самокалибровки относительно магнитного поля Земли.

Представим фильтрацию данных полученных измерением углов с гироскопов, акселерометров и гаусометров в фильтре Калмана, например, при прямолинейном движении с учётом выборки измерений в течение некоторого времени t

$$x_{i+1}(t) = x_i(t) + v_x(t)/dt, \qquad (26)$$

где $v_x(t)$ – ускорение, $x_i(t)$ – скорость.

Требуется оценить точность определения изменения координаты с учётом случайной составляющей шума измерений ξ:

$$x_{i+1}(t) = x_i(t) + \frac{v_x(t)}{dt} + \xi_i. \qquad (27)$$

Система измерения вектора формирует массив последовательных отсчётов, взятых в дискретные моменты времени, поэтому массив может быть представлен корреляционной матрицей математического ожидания [23]:

$$E = M[X_k X_k^T] = M\begin{bmatrix} x_{0k}^2 & \cdots & x_{0k}x_{lk} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{lk}x_{0k} & \cdots & x_{lk}^2 \end{bmatrix} \qquad (28)$$

Главная диагональ – это среднеквадрати-ческие значения входных отсчётов измерения, остальные компоненты соответствуют значениям взаимокорреляционной функции. Полезный сигнал d_k выражается через элементы взаимокорреля-ционной функции:

$$K = M[d_k X_k] = M[d_k x_{0k}\ d_k x_{1k} \ldots d_k x_{lk}]^T. \qquad (29)$$

Среднеквадратическое отклонение (СКО):

$$\sigma = M[\xi_k^2] = M[d_k^2] + W^T E W - 2K^T W, \qquad (30)$$

где W – матрица весовых коэффициентов, W^T – вектор столбец весовых коэффициентов.

Используя средства Matlab R14, реализуем алгоритм одномерной фильтрации (30) с использованием фильтра Калмана, как показано на рис. 3.

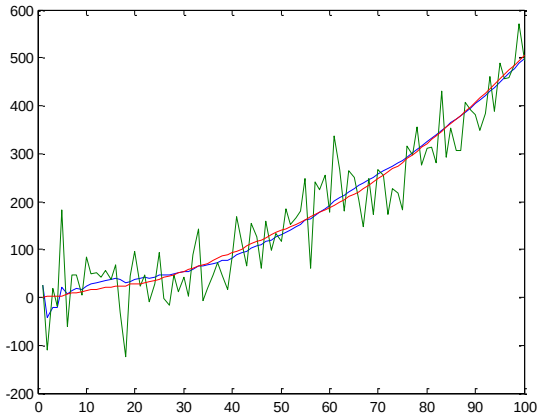


Рис. 3. Вывод алгоритма одномерной фильтрации с использованием фильтра Калмана

Использование фильтра Калмана позволяет получить хорошее приближение измеряемого параметра к условиям динамики, как показано на рис. 3, используя блок из ста итераций. В то же время дрейф характеристик измерителя никак не компенсируется наблюдениями сигнала. Если в системе измерения и автоматического управления безэкипажным объектом имеется опорный сигнал измерения вектора состояния с использованием системы глобальной спутниковой (ГНСС) навигации GPS/ГЛОНАСС/BeiDou, то использо-вание фильтра Калмана стоит признать удовлетворительным.

В тоже время ограниченность (или невозможность) применения систем ГНСС приводит к эффекту накопления ошибки определения положения объекта.

Фильтр Маджвика выполняет компенсацию дрейфов гироскопов и акселерометров, используя магнитометр для корректировки ошибок ориентации по оси рыскания. Коррекция также включает обработку магнитных искажений. Судовой блок получает периодические поправки позиции и курса от ГНСС и навигационной системы судна. В результате достигается высокая точность позиционирования судна и устойчивость к ошибкам, связанным с дрейфом характеристик МЭМС сенсоров и магнитными искажениями.

Алгоритм, реализующий модифицированный фильтр Маджвика и приведенный на рисунке 4, построим на основе следующих предложений:

– коррекция ошибок счислений магнитометров предполагается при неизменности курса судна;

– при выполнении маневров изменение скорости происходит с известной зависимостью, описываемой некоторой вычисляемой функцией;

– определение скорости судна происходит относительно наблюдателя в неподвижной системе координат.

Принципиальным отличием модифицированного фильтра Маджвика является оценка динамики судна на основе двух составляющих скорости судна относительно первой подвижной системы координат и стабильности магнитного поля Земли.

Вращение кватерниона в подвижной системе координат относительно неподвижной (1-6), для варианта вращения кватерниона (10) можно описать как:

$$H_{XYZ} = {}^{B}_{A}\hat{q}_{est,t-1} \otimes {}_{A}v \otimes {}^{B}_{A}\hat{q}^{*}_{est,t-1}, \quad (31)$$

где ${}_{A}v$ – скорость относительно первой подвижной системы координат. При задании кватерниона скалярная часть w – равна нулю, $h_z = 0$, т.е. рыскание отсутствует. Таким образом, нас интересует курсовая устойчивость, определяемая дифферентом и креном, описываемая кватернионом:

$$\hat{q}_{est,t-1} = (w, vx, vy, vz), \quad (32)$$

где w – скалярная часть кватерниона, vx, vy, vz – составляющие поворотов вращения кватерниона.

Особенностью магнитного поля Земли является его относительная стабильность, поэтому положение вектора магнитного поля, измеренного в пространстве:

$$H_{XYZ} = \left[0 \ \sqrt{h_x^2 + h_y^2} \ 0 \ h_z\right], \quad (33)$$

где h_x и h_y – определяют величину напряжённости поля, h_z – совпадает по направлению с вектором напряжённости.

Входными параметрами модифицированного алгоритма Маджвика являются:

– скорость судна относительно первой подвижной системы координат «А» – ${}_{A}v$;

– измеряемые значения магнитометра – $S_{\hat{h}_t}$;

– измеряемые значения с трёхосевого акселерометра – $s_{\hat{a}_t}$;

– измеряемые значения частоты с трёхосевого гироскопа – ${}^{S}\omega_{c,t}$;

– значения углов в первой подвижной системе, координат – ξ, η, ζ;

– ε – угол между проекциями $O\xi$ и $O_1\xi_1$.

В первых четырёх блоках вычисляется кватернион, описывающий динамику судна относительно неподвижной системы координат.

Преобразование кватерниона в первой подвижной системе координат «А» относительно неподвижной «В» запишем через обозначения надстрочных и подстрочных индексов по Крэйгу. ${}^{B}_{A}\hat{q}_{est,t-1}$ – спереди стоящий нижний индекс, система координат, в которой определено значение кватерниона $\hat{q}$, спереди стоящий верхний индекс – система связанных координат судна включая собственной системы координат датчика. Опорный вектор ${}_{A}v$ – спереди стоящий индекс вверху показывает систему, в которой он вычислен – опорный вектор истинного курса судна.

Символ $\otimes$ соответствует операции последовательных поворотов кватерниона на указанное направление главного направления (вектора) движения. Реализуя процедуру циклического перебора значений, измеренных магнетометром и определённых в первой подвижной системе координат, выполняем процедуру коррекции значений, измеренных гироскопами, с истинным значением магнитного поля земли относительно неподвижной системы координат.

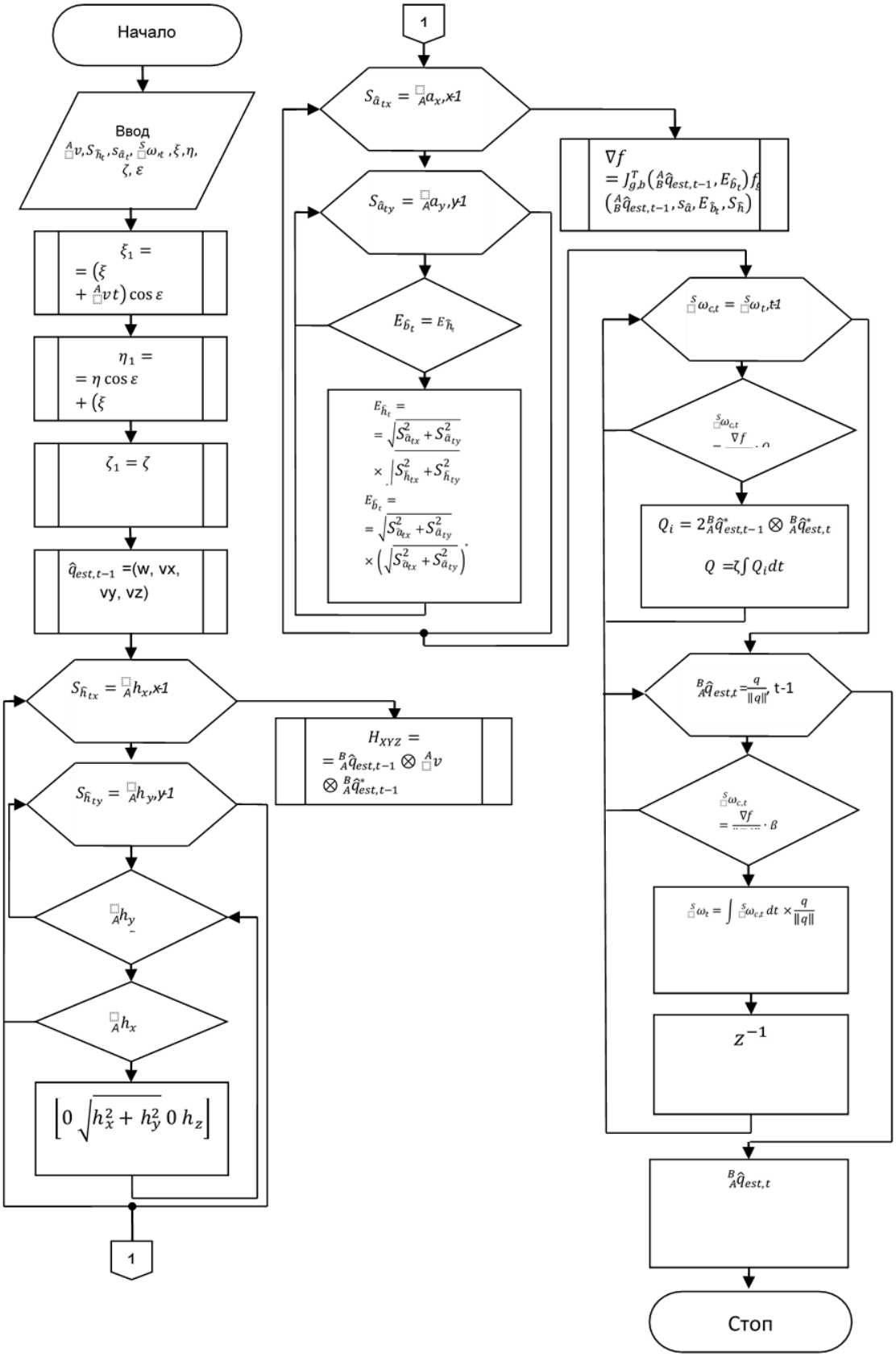


Рис. 4. Алгоритм модифицированного фильтра Маджвика

Значение модуля градиента магнитного поля Земли позволяет вычислить кватернион, описывающий динамику судна относительно неподвижной системы координат.

Значения $\left[0\ \sqrt{h_x^2+h_y^2}\ 0\ h_z\right]$ соответствуют скорректированным значениям магнитометра, вектор главного направления относительно измеренных направлений на магнитный полюс Земли.

На следующем этапе выполнения алгоритма измерения гравитационного поля Земли, поступающие с акселерометра, корректируются значениями, измеренными и скорректированными главным вектором от магнетометра. Условием компенсации дрейфа характеристик акселеро-метра является равенство значений гравита-ционного и магнитного поля относительно выбран-ных направлений движения.

В результате, вычисляется кватернион динамики судна со скорректированными значениями измеренных с акселерометра ускорений и с компенсированным дрейфом характеристик.

Нормированная величина поправки дрейфа характеристик позволяет вычислить значения целевой функции преобразования координат из первой подвижной системы координат в неподвижную.

Результаты вычислений целевой функции:

$$\nabla f = J_{g,b}^{T}\left({}_{B}^{A}\hat{q}_{est,t-1}, E_{\hat{b}_t}\right) f_{g,b}\left({}_{B}^{A}\hat{q}_{est,t-1}, s_{\hat{a}}, E_{\hat{b}_t}, S_{\hat{h}}\right), \qquad (34)$$

после выполнения условия нормировки к единице $\frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \le 1$, поступают в Блок 2 – коррекции дрейфа гироскопа.

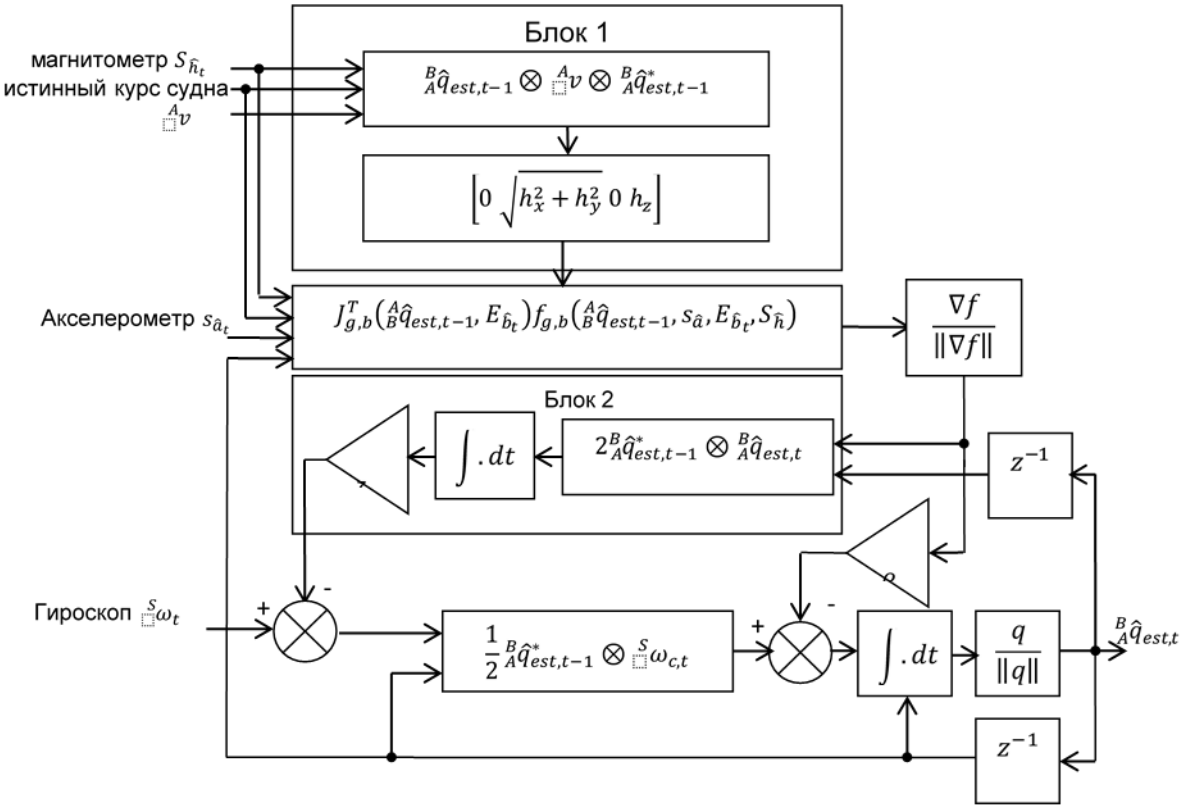


Рис. 5. Структурная схема модифицированного фильтра Маджвика

Измеренные значения гироскопа (вектор) после вычитания вектора корректур поступают в блок вычислений поворота кватерниона положения центра масс судна. После вычитания нормированного значения целевой функции коррекции измерений магнитометра и акселерометра нормированное значение кватерниона положения сенсора, совпадающее с центром масс судна, выдаётся в систему управления.

Дрейф нуля гироскопа, учитываются коэффициентом усиления фильтра β, от нормированной целевой функции поправок в измерения по определению направлений от магнетометра и акселерометра.

На рисунке 5 изображёна структурная схема модифицированного фильтра Маджвика, в котором, в отличие от оригинала [20; 24], имеется канал формирования опорного (главного) направления (истинного судна курса). Блок 1 коррекции магнитометра (коррекции магнитных искажений) обеспечивает коррекцию счислений положения магнитного поля Земли относительно истинного курса судна, что позволяет избежать условия неподвижности датчика магнитного поля при определении пространственной ориентации относительно магнитного поля Земли. Указанное условие реализуется вычислением целевой функции по Крэйгу.

Действительно при учёте дифферента и крена при простом прямолинейном движении. Погрешности, вызываемые методикой измерения, учитываются коэффициентом усиления фильтра ζ (блока 2). Источники погрешностей: шум датчика, сглаживающий фильтр, ошибки квантования, ошибки калибровки, ошибки установки и выравнивания датчика, неортогональность осей датчика и частотные характеристики.

Результаты

Натурные измерения, выполненные в условиях широта $\varphi^0 = 44{,}67$ и долгота $\lambda^0 = 37{,}72$ сенсором типа BNO055 (интеллектуальный 9-ти осевой сенсор абсолютной ориентации фирмы Bosch) позволяют выполнить проверку предложенного алгоритма. Для этой цели рассмотрим модель трёхосевого гироскопа разработанную в редакторе Simulink и приведенную на рисунке 6.

Рассмотрим вращение кватерниона (10) как комбинацию поворотов:

– первый поворот – рысканье (вокруг Z) 90 градусов по часовой;

– второй поворот – дифферент (вокруг Y) 90 градусов по часовой;

– третий поворот – крен (вокруг X) 90 градусов по часовой.

Для поворота вида $M = M\big(X(\theta), Y(\varphi), Z(\psi)\big) = XYZ$, производится счисление данных записанных в память данных микропроцессора сенсора типа BNO055 и импортированных в рабочую область редактора MATLAB Realize 14, блок модели G3, массив выборки 28757 отсчётов численного формата Double, далее импортируются в блок типа «Simin» модели редакторе Simulink.

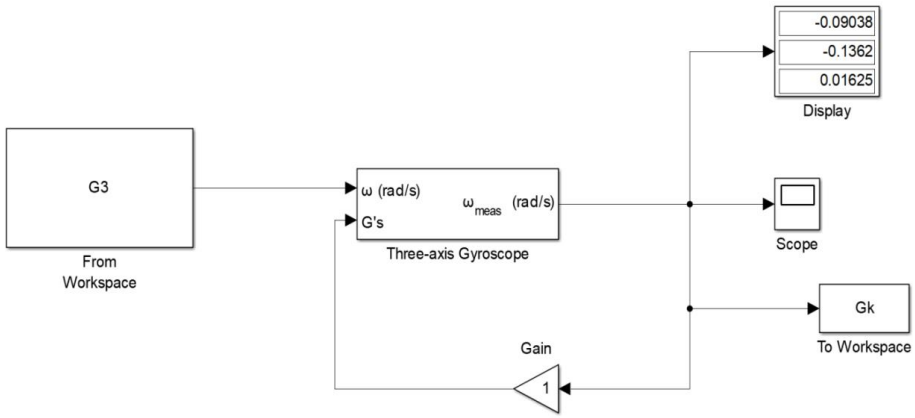


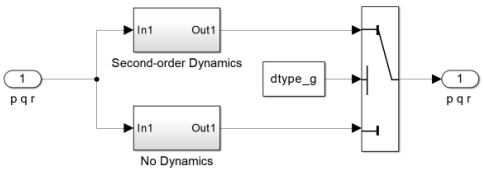
Рис. 6. Укрупнённая модель обработки данных счисления с трёхосевого гироскопа

Погрешность измерения учитывается суммированием погрешностей с блока «g_bias». Компенсация дрейфа характеристик учитывается уставками блока «g_sen» и усилением в цепи положительной обратной связи.

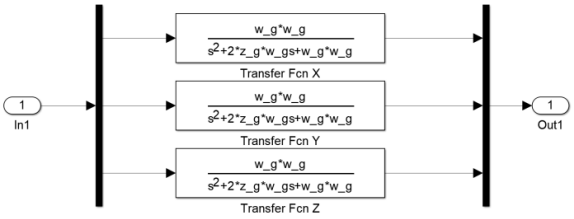
Модель шума измерений, вызванных, в том числе дрейфом характеристик представлена блоком «Random bias». Блок «Dynamics», рисунок 8, содержит передаточные функции вкладки «Second-order Dynamics» (рисунок 8 «б») блока «Dynamics». Выходными параметрами модифицированного фильтра Маджвика являются скомпенсированные значения гироскопов с учётом дрейфа характеристик.

При этом опорной моделью служат счисления трёхосевых гаусометров и трёхосевых акселерометров.

В знаменателе передаточной функции указаны значения кватернионов умноженных на сопряженные, в числителе входная функция, скорректированная по показаниям сопряжённого кватерниона, построенного по скорректированным значениям фильтра Маджвика, структурная схема которого показана на рисунке 5. Выводом модели являются значения вычислений трёхосевого гироскопа, с скомпенсированным дрейфом характеристик.



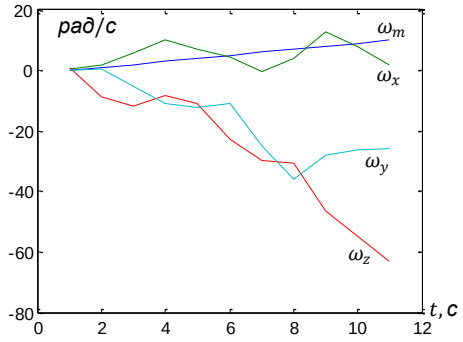
а) вкладка блока «Dynamics»



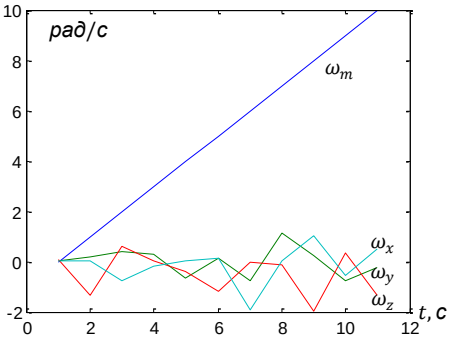
б) передаточные функции вкладки «Second-order Dynamics» блока «Dynamics»

Рис. 8. Структурная схема блока «Dynamics»

На рисунке 9 приведены графики измерений частоты гироскопа при изменении положения центра масс с некомпенсированным дрейфом нуля (рисунок 9 а) и с компенсированным дрейфом характеристик трёхосевого гироскопа. Аналогично гироскопу такие же поправки рассчитываются для трёхосевого акселерометра. Как следует из рисунка, за счёт дрейфа характеристик, возможны значительные отклонения частоты гироскопа до 60 рад/сек в рассматриваемом примере. Указанные особенности не исключают фактор калибровки гироскопа при отработке системы управления.



а) характеристики с некомпенсированным дрейфом характеристик гироскопа



а) характеристики с компенсированным дрейфом характеристик гироскопа

Рис. 9. Графики измерений частоты гироскопа при изменении положения центра масс

Вычисленные значения измерений положения центра для трёхосевого гироскопа с изменением масштаба частоты ω_m приводятся на рисунке 10.

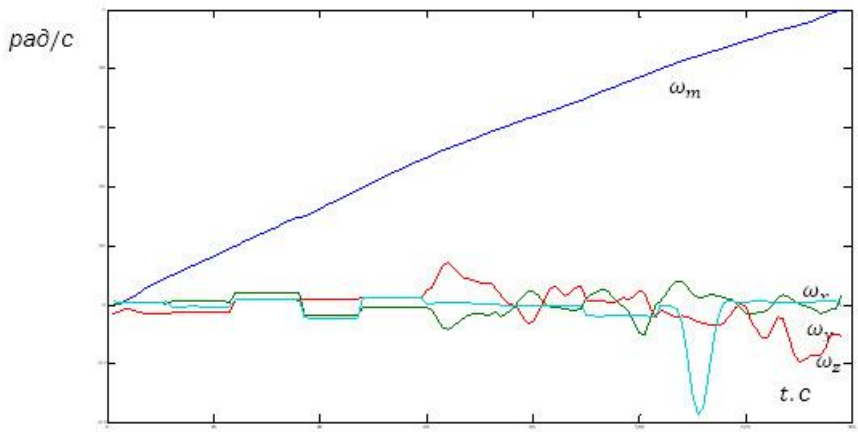


Рис. 10. Динамика измерений гироскопом центра масс безэкипажного судна

Построение системы автоматического измерения положения безэкипажного судна с учётом всех измерений девятиосевых сенсоров, использующих алгебру кватернионов (10-34) позволяет реализовать эффективное отображение динамики безэкипажных судов.

Заключение

Разработка методов оценки динамики беспилотных судов, осуществляемой с помощью девятиосевых сенсоров с использованием опорного направления ориентации датчика по отношению к магнитному полю Земли или истинному курсу судна, определяемому по данным ГНСС, представляет собой актуальную задачу. В данной работе рассмотрена классическая система корабельных углов Благовещенского С.Н., модифицированная для вычисления динамики судов в алгебре кватернионов.

Построение матриц преобразования на основе измерений угловых скоростей трёхосевого гироскопа и ускорений трёхосевого акселерометра требует компенсации дрейфа характеристик датчиков. Использование стандартного фильтра Маджвика, базирующегося на опорных измерениях трёхосевого магнитометра, может приводить к существенным искажениям работы всей сенсорной системы из-за влияния собственных магнитных полей судна. В предлагаемом модифицированном алгоритме фильтра Маджвика осуществляется коррекция относительно истинного курса судна, определяемого по данным ГНСС, что позволяет повысить точность оценивания динамики судна.

Опорными значениями измерений и фильтрации данных в трёхосевых гироскопах с использованием фильтра Маджвика является закон изменения скорости судна относительно первой подвижной

системы координат, включая измерения магнитометра.

Ещё один важный вывод – необходимость виртуального разбиения маршрута безэкипажного судна на участки, для которых определены траектории и закон изменения скорости. С учётом прогнозируемого положения магнитного полюса Земли и закона изменения скорости можно снизить ошибки счисления, обусловленные динамикой судна и дрейфом измерительных систем (трёхосевых магнитометров, акселерометров и гироскопов).

Литература

1. Благовещенский, С.Н. Холодилин, А.Н. Справочник по статике и динамике корабля. В двух томах. Изд. 2-е перераб. и доп. Том 2. Динамика (качка) корабля. Л.: Судостроение. 1976. 176 с.
2. Tristan Perez, Thor I. Fossen Kinematic Models for Manoeuvring and Seakeeping of Marine Vessels. Modeling, Identification and Control, Vol. 28, No. 1, 2007, pp. 19–30
3. Wang L., Han S. Visual simulation of a capsizing ship in stormy weather condition. The Visual Computer. 2019. – Т. 35. №. 12. С. 1855-1868.
4. Rawson, A., Brito, M., Sabeur, Z., & Tran-Thanh, L. A machine learning approach for monitoring ship safety in extreme weather events. Safety science. 2021. Т. 141. С. 105336.
5. Попов А. Н., Пакшина Е. Р., Колесников А. А. Анализ моделей и алгоритмов беспроводных радиоканалов широкополостной связи для решения задач без экипажного судовождения в зоне ответственности системы управления движением судов порта Новороссийск. Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 1. Ч. 1. С. 272–282.
6. Томилин А.Н., Боран-Кешишьян, Томилина С. Н., Туктаров Р. Р. Особенности проявления «человеческого фактора» и его негативное влияние на безопасность мореплавания. Эксплуатация морского транспорта. 2022. № 4 (105). С. 36-46.
7. Mahony R., Hamel T., Pflimlin J. M. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group. IEEE Transactions on automatic control. 2008. Vol. 53, No. 5. P. 1203–1218.
8. Madgwick S. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. Report x-io and University of Bristol. 2010. Vol 25. P 113-118.
9. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Юсып В.М. Конструктивные решения, повышающие безопасность мореплавания в условиях шторма, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 3, С. 19—26.
10. Дыда А. А., Пляшешник К. Н., Пушкарев И. И. Построение модели динамики безэкипажного судна по курсу на основе экспериментальных данных. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2020. Т. 12. № 4. С. 716–725.
11. Madgwick, S. O. (2014). *AHRS algorithms and calibration solutions to facilitate new applications using low-cost MEMS* (Doctoral dissertation, University of Bristol).
12. Маевский М.А., Кожемякин И.В. Применение систем искусственного интеллекта в морской робототехнике. Существующие разработки в мире и возможности развития в РФ. Морские информационно-управляющие системы. 2021, №1(19), С. 39-49.
13. Chernov, N.N., Palii, A.V., Saenko, A.V., Maevskiy A.M A Method of Body Shape Optimization for Decreasing the Aerodynamic Drag Force in Gas Flow. Technical Physics Letters, 2018, Vol. 44, No. 4, pp. 328-330.
14. Kostyukov, V.A., Maevskiy A.M., Medvedev, M.Yu., Pavlenko, D.D., Poluyanovich, N.K. Investigation of a rotor speed controlling of a promising wind-driven power plant using several variable elements of its geometry // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie., 2020, 21(10), pp. 599–608
15. Dmitry Nikushchenko, Andrey Maevskiy, Igor Kozhemyakin, Vladimir Ryzhov, Alexander Bondar, Artem Goreliy, Ivan Pechaiko and Ekaterina Nikitina. Development of a Cascade Intelligent System for Path Planning of the Group of Marine Robotic Complexes J. Mar. Sci. Eng. 2023, 11(3), 610.
16. Nikushchenko, D.; Maevskiy, A.; Kozhemyakin, I.; Ryzhov, V.; Goreliy, A.; Sulima,T. Development of a Structural-Functional Approach for Heterogeneous Glider-Type MarineRobotic Complexes' Group Interaction to Solve Environmental Monitoring and Patrolling Problems.J. Mar. Sci. Eng.2022,10, 1531.
17. Ibrahim, Raouf & Grace, I. Modeling of Ship Roll Dynamics and Its Coupling with Heave and Pitch. Mathematical Problems in Engineering. 2010. 10.1155/2010/934714.
18. Dumitru, D. Numerical investigation of a two-degrees-of-freedom ship model for pitch-roll motion. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 145, No. 8, p. 082007.
19. Alexandersson M., Mao W., Ringsberg J. W. Analysis of roll damping model scale data. Ships and Offshore Structures. 2021. Т. 16. №. sup1. 85-92 pp.
20. Alexandersson M., Mao W., Ringsberg J. W. System identification of vessel manoeuvring models. Ocean Engineering. 2022. Т. 266. s. 112940.
21. Guzelbulut, C. Identification of Ship Maneuvering Behavior Using Singular Value Decomposition-Based Hydrodynamic Variations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025. *13*(3), 496.
22. Yoshimura, Y., Nakamura, M., Taniguchi, T., & Yasukawa, H. Empirical formulas of hydrodynamic parameters for predicting ship maneuvering based on the MMG-model. *Ocean Engineering*. 2025. *337*, 121831.
23. Уидроу, Б. Стирнз, С Адаптивная обработка сигналов / Уидроу Б., Стирнз С. Пер.с англ. М.: Радио и связь. 1989.
24. Патент № 2856752 C1 Российская Федерация, МПК G01S 19/48, G01S 19/41. система определения ориентации и позиционирования универсально-многоцелевого буксируемого комплекса заявл. 24.09.2025: опубл. 24.02.2026 / И. М. Данцевич, И. И. Бузенков, М. Н. Лютикова, С. О. Малахов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова".

References

1. Blagoveshchensky, S.N. Kholodilin, A.N. Handbook on the statics and dynamics of the ship. In two volumes. Ed. 2nd revision. and Vol. 2. Dynamics (pitching) of the ship. L.: Shipbuilding. 1976. 176 s.
2. Tristan Perez, Thor I. Fossen Kinematic Models for Manoeuvring and Seakeeping of Marine Vessels. Modeling, Identification and Control, Vol. 28, No. 1, 2007, pp. 19–30.
3. Wang L., Han S. Visual simulation of a capsizing ship in stormy weather condition.The Visual Computer. 2019. Т. 35. №. 12. С. 1855-1868.
4. Rawson, A., Brito, M., Sabeur, Z., & Tran-Thanh, L. A machine learning approach for monitoring ship safety in extreme weather events. *Safety science*. 2021.*141*, 105336.
5. Popov A. N., Pakshina E. R., Kolesnikov A. A. Analysis of models and algorithms of wireless radio channels of broadband communication for solving problems of unmanned navigation in the area of responsibility of the vessel traffic control system of the port of Novorossiysk. Marine intelligent technologies. 2025. No. 1. Part 1. Pp. 272–282.
6. Tomilin A. N., Boran-Keshishyan, Tomilina S. N., Tuktarov R. R. Features of the manifestation of the "human factor" and its negative impact on the safety of navigation. Operation of marine transport. 2022. No. 4 (105). Pp.
7. Mahony R., Hamel T., Pflimlin J. M. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group. IEEE Transactions on automatic control. 2008. Vol. 53, No. 5. P. 1203–1218.
8. Madgwick S. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. Report x-io and University of Bristol. 2010. Vol 25. P. 113-118.
9. Evgeny P. Burakovskiy, Pavel E. Burakovskiy, Vyacheslav M. Yusyp Design solutions that increase the safety of navigation in storm conditions. 2022. № 4 part 3, P. 19-26.
10. Dida A. A., Plyasheshnik K. N., Pushkarev I. I. Construction of a model of the dynamics of an unmanned vessel on a course based on experimental data. Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and River Fleet. 2020. Vol. 12. No. 4. Pp. 716–725.
11. Maevsky M.A., Kozhemyakin I.V. Application of artificial intelligence systems in marine robotics. Existing developments in the world and development opportunities in the Russian Federation. Marine Information and Control Systems. 2021, No. 1(19), pp. 39-49.
12. Chernov, N.N., Palii, A.V., Saenko, A.V., Maevskiy A.M A Method of Body Shape Optimization for Decreasing the Aerodynamic Drag Force in Gas Flow. Technical Physics Letters, 2018, Vol. 44, No. 4, pp. 328-330.
13. Kostyukov, V.A., Maevskiy A.M., Medvedev, M.Yu., Pavlenko, D.D., Poluyanovich, N.K. Investigation of a rotor speed controlling of a promising wind-driven power plant using several variable elements of its geometry // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie., 2020, 21(10), pp. 599–608
14. Dmitry Nikushchenko, Andrey Maevskiy, Igor Kozhemyakin, Vladimir Ryzhov, Alexander Bondar, Artem Goreliy, Ivan Pechaiko and Ekaterina Nikitina. Development of a Cascade Intelligent System for Path Planning of the Group of Marine Robotic Complexes J. Mar. Sci. Eng. 2023, 11(3), 610.
15. Nikushchenko, D.; Maevskiy, A.; Kozhemyakin, I.; Ryzhov, V.; Goreliy, A.; Sulima,T. Development of a Structural-Functional Approach for Heterogeneous Glider-Type MarineRobotic Complexes' Group Interaction to Solve Environmental Monitoring and Patrolling Problems.J. Mar. Sci. Eng.2022,10, 1531.
16. Ibrahim, Raouf & Grace, I. Modeling of Ship Roll Dynamics and Its Coupling with Heave and Pitch. Mathematical Problems in Engineering. 2010. 10.1155/2010/934714.
17. Dumitru, D. Numerical investigation of a two-degrees-of-freedom ship model for pitch-roll motion. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 145, No. 8, p. 082007.
18. Alexandersson M., Mao W., Ringsberg J. W. Analysis of roll damping model scale data. Ships and Offshore Structures. 2021. Т. 16. №. sup1. 85-92 pp.
19. Alexandersson M., Mao W., Ringsberg J. W. System identification of vessel manoeuvring models. Ocean Engineering. 2022. Т. 266. s. 112940.
20. Guzelbulut, C. Identification of Ship Maneuvering Behavior Using Singular Value Decomposition-Based Hydrodynamic Variations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025. *13*(3), 496.
21. Yoshimura, Y., Nakamura, M., Taniguchi, T., & Yasukawa, H. Empirical formulas of hydrodynamic parameters for predicting ship maneuvering based on the MMG-model. *Ocean Engineering*. 2025. *337*, 121831.
22. Madgwick, S. O. (2014). *AHRS algorithms and calibration solutions to facilitate new applications using low-cost MEMS* (Doctoral dissertation, University of Bristol).
23. Bernard Widrow, Samuel D. Stearns Adaptive signal processing. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J. 07632.
24. Prompt24. Patent No. 2856752 C1 Russian Federation, IPC G01S 19/48, G01S 19/41. Orientation and positioning system for a universal multi-purpose towed complex: filed 24.09.2025; published 24.02.2026 / I. M. Dantsevich, I. I. Buzenkov, M. N. Lyutikova, S. O. Malakhov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education 'Admiral F.F. Ushakov State Maritime University'.

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

Данцевич Игорь Михайлович кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова», 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93, e-mail: dantsevich.aumsu@gmail.com

Igor M. Dantsevich, Ph.D. (Eng), Candidate of Technical Science, Department of Radioelectronics and Information Technologies Admiral Ushakov Maritime State University, 353924, Russia, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: dantsevich.aumsu@gmail.com

Зеленков Геннадий Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353924, Россия, г. Новороссийск, Краснодарский край, пр. Ленина, 93, e-mail: mathshell@mail.ru

Gennady A. Zelenkov, Dr.Sci. (Phys & Math), Professor, Admiral Ushakov Maritime State University, 353924, Russian Federation, Novorossiysk, Krasnodar Region, Lenin Ave. 93, e-mail: mathshell@mail.ru

Томилин Александр Николаевич, доктор педагогических наук, профессор, Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353924, Россия, г. Новороссийск, Краснодарский край, пр. Ленина, 93, e-mail: tomilin.sania2012@yandex.ru

Alexandr N. Tomilin, Dr. Sci. (Edu), Professor, Admiral Ushakov Maritime State University, 353924, Russian Federation, Novorossiysk, Krasnodar Region, Lenin Ave. 93, e-mail: tomilin.sania2012@yandex.ru

Лютикова Марина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93., e-mail: mnlyutikova@mail.ru

Marina N. Lyutikova, Ph.D. (Eng), Candidate of Technical Science, Department of Radioelectronics and Information Technologies, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: mnlyutikova@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 13.05.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 14.08.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 17.08.2026.