

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

110100100100100010101010110101010000110111000110010010010110011001100010 ISSN 2073-7173 (print)
 0010100100101011110100110100100010111001001110010101001100100110001100 ISSN 2588-0233 (on line)
 10010001111001101111001010011011100110010100011010100110010101100010100100101011110100110
 00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100
 00110101001101001000010110100101010001001000011111100110011001101101011001110000001110010100101
 110111001100101011110010101001010011010011100010110010100110010101111001010111100101101001010
 0000111010100111100010101100100011100110110100100110110110011001010100111001010011001001001100
 1100110001110010011000101001010011110101010100000101010100011010111001100100011100101001001010
 00101001110011010011110001010010101110101001000010110001100110010101100010101100110100101001



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



THOMSON REUTERS
WEB OF KNOWLEDGE



ULRICH'S
KNOWLEDGEBASE

№ 1 Часть 1 2024
№ 1 Part 1 2024

Morskie intelektual 'nye tehnologii



010001101100000110110110001010010011101001110011010011101001101000011101100111001010
 110010111100010011000011011011101101000100110100110010001010010101000110101110100001
 01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
 110101100001010111101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001
 10011010011011111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 101
 01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 011





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

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 1 часть 1 2024 Сквозной номер 63

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. Форма выпуска: печатный, электронный. Язык текстов: русский, английский. Язык метаданных: русский, английский. Статьям присваивается уникальный идентификатор DOI.

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

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

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта www.morintex.ru из раздела «для авторов». Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2014 год и с № 3(25) 2014 полные выпуски размещены на сайте журнала <http://morintex.ru> в открытом доступе. Стоимость публикации 18000 рублей. Стоимость публикации включает: публикацию в журнале, электронное издание журнала, размещение в научной электронной библиотеке E-library, в Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI) и в Ulrich's Knowledgebase. Для аспирантов публикации бесплатно, если аспирант единственный автор.

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

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

Рубрики журнала

(соответствуют специальностям научных работников номенклатуры ВАК 2022)

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

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

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

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

Член Ассоциации научных редакторов и издателей.

Адрес: 190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3.

Тел./факс +7 (812) 513-04-51, бесплатный звонок по России 8 800 201 3897,

e-mail: mit-journal@mail.ru

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

Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

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

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

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

Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ».

Тираж 100 экз.

Стоимость номера журнала без доставки 3500 рублей.

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова

© ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ», 2024



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

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 1 part 1 2024 www.morintex.ru
Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

ABOUT SCIENTIFIC JOURNAL «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Frequency of publication - 4 issues per year.

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

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

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

Journal headings:

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

The journal is coming since 2008

Publication frequency — 4 issues per year

The journal is included into the system of Russian Science Citation Index u and into international abstract database Web of Science (Emerging Sources Citation Index (ESCI)).

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

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

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

Member of Association of science editors and publishers.

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

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

e-mail: mit-journal@mail.ru

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

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

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

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

Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova

© RESEARCH CENTRE «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES» Ltd, 2024



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

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

www.morintex.ru

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор:

Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора

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

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

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

Члены Редколлегии

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

Е. П. Бураковский, д.т.н., профессор, филиал Военно-морской академии, Калининград

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакционный Совет

Председатель

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

Члены Совета

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

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

Г.Н. Муру, к.т.н., генеральный директор, 51 ЦКТИ судоремонта, Санкт-Петербург

С.А. Огай, д.т.н., Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток

Одд М. Фалтинсен, профессор, Норвежский университет науки и технологии, Норвегия

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

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



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

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor

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

Editorial Staff Deputy Chief Editors

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

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

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

Members of Editorial Staff

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Board chairmen

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

Council Members

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

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

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

S.A. Ogai, Doctor of Engineering, Associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi, Vladivostok, Russia

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

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

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

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

- **Дмитрий Алексеевич Скороходов**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук
- **Николай Васильевич Никитин**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Виктор Леонидович Мартынов**, доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Сергей Алексеевич Огай**, доктор технических наук, доцент, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Сергей Валентинович Чехранов**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет
- **Станислав Альбинович Скоморовский**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Евгений Петрович Бураковский**, доктор технических наук, филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала Н.Г. Кузнецова» в г. Калининграде
- **Александр Алексеевич Таранцев**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук
- **Сергей Николаевич Хрунков**, доктор технических наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
- **Павел Александрович Бимбереков**, доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет водного транспорта
- **Александр Львович Кузнецов**, доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Виктор Иванович Филатов**, кандидат технических наук, Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова
- **Сергей Николаевич Рюмин**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Анатолий Николаевич Соболенко**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Юрий Леонардович Сиек**, доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Виктория Юрьевна Семенова**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Юрий Марсович Искандеров**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский Федеральный Исследовательский Центр Российской академии наук
- **Николай Николаевич Гордеев**, кандидат технических наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Елена Борисовна Амбросовская**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» В.И. Ульянова (Ленина)
- **Александр Викторович Кириченко**, доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

**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, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Victor L. Martynov**, Dr.Sci.(Eng), Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Sergei A. Ogai**, Dr. Sci. (Eng), associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi
- **Sergei V. Chekhranov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Far Eastern State Technical Fisheries University
- **Stanislav A. Skomorovskii**, Ph.D. (Eng), associate professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Evgeny P. Burakovskiy**, Dr. Sci. (Eng), Admiral N. G. Kuznetsov Naval Academy (Branch Kaliningrad)
- **Alexander A. Tarantsev**, Dr. Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Sergey N. Khrunkov**, Dr.Sci. (Eng), Associate Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
- **Pavel A. Bimberekov**, Dr. Sci. (Eng.), Assistant professor, Siberian state University of water transport,
- **Aleksandr L. Kuznetsov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Viktor I. Filatov**, Ph.D. (Eng.), Admiral Ushakov Maritime State University
- **Sergey N. Ryumin**, Ph.D. (Eng), Assistant Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Anatoly N. Sobolenko**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Maritime State University named after G.I. Nevelskoi
- **Yuriy L. Siek**, Dr. Sci. (Eng), Assistant professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Viktoriya Yu. Semenova**, Dr. Sci. (Eng.), 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
- **Nikolai N. Gordeev**, Ph.D. (Eng), St. Petersburg State Marine Technical University
- **Elena B. Ambrosovskaya**, Ph.D. (Eng), Associate Professor St. Petersburg State Electrotechnical University (LETI)
- **Aleksandr V. Kirichenko**, Dr. Sci. (Eng), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

СОДЕРЖАНИЕ	стр.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ	
Васильев А.А., Овчинников К.Д. Анализ проектных характеристик судов снабжения ледового класса при применении альтернативных источников энергии.....	11
Тряскин В.Н., Дехтярь И.В., Рюмин С.Н. Геометрическое и конструктивное моделирование в задачах проектирования поперечных гофрированных переборок судов для перевозки навалочных грузов.....	20
Аносов А.П., Антоненко С.В., Бессонова В.О., Воробьева А.А. Сопротивление воды движению маломерных судов с упрощёнными обводами.....	31
Малыгин И.Г., Гурлев И.В. Инновационные технологии в развитии морского транспорта.....	41
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Веревошкин А.В., Юсып В.М. Разработка новой формы носовой оконечности судна для повышения безопасности мореплавания в штормовых условиях.....	51
Шапков Е.В., Тряскин Н.В., Андрюшин А.В. Анализ работы роторно-винтового движителя в воде.....	59
Маевский А.М. Прогнозирование маршрутов движения морских беспилотных транспортных объектов в реальных условиях плавания на основе характеристической модели глобального поля течений.....	66
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Русановский С.А., Худяков М.П., Ковин П.С. Методика моделирования фаски отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения под варку насыщения Часть 4 Экспериментальные исследования применимости методики.....	73
Кузнецов Ю.П., Чуваков А.Б., Погодин Р.А., Хрунков С.Н., Крайнов А.А. Согласование параметров воздухоподводящего рукава с характеристиками привода пневмомашин.....	81
СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Минасян М.А., Минасян А.М. Методика проектирования гиперболических канатных муфт «MAMSar»	89
Минасян М.А., Минасян А.М. Методика статических испытаний виброизоляторов MAMSar с упругими элементами из стального каната и полимерного композитного материала в качестве виброизолирующих муфт.....	97
Гоняева С.С., Кожемякин В.В., Кожемякин В.О., Морозов Н.А., Николаева С.А., Аполлова А.В. Система аварийного расхолаживания.....	105
Петров А.П., Костылев И.И., Живлюк Г.Е. Оценка рисков эксплуатации энергетических установок безэкипажных судов.....	110
Попов Е.И., Некрасов В.А., Фомин А.В. Обзор способов регулирования гидравлических сопротивлений.....	123
Кожемякин В.В., Морозов Н.А., Раевская Ю.И., Левша Д.П. Влияние режимных параметров на статические характеристики двигательно-двигательного инжектора.....	129
Руднев Б.И., Повалихина О.В. Оценка влияния энергетических параметров излучения пламени на локальный радиационный теплообмен в камере сгорания судовых дизелей.....	135
Руднев Б.И., Повалихина О.В. Датчик радиационного теплового потока и устройство для его установки в крышке цилиндра судового высокооборотного дизеля.....	142
Аполлова А.В., Романовская А.К. Оптимизация точек отборов из турбины с помощью модели паротурбинной установки в среде моделирования simintech.....	147
Туркин В.А., Игнатенко Г.В., Беляев В.В., Зубко С.С., Краевой А.И. Адсорбционная очистка отработавших газов судового энергетического оборудования.....	153

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

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.....	159
Ле В.Н., Ронжин А.Л. Обзор интеллектуальных систем управления и робототехнических задач в производстве аквакультуры.....	171
Скороходов Д.А., Маринов М.Л., Каминский В.Ю. Системные принципы обеспечения экологической безопасности транспортной системы Северного морского пути.....	181
Краснодубец Л.А., Конева С.А., Цалоев В.М. Управление вертикальным движением автономного ныряющего буя в поле гидростатического давления океанской стратифицированной среды.....	191
Тузова А.А., Кузнецов А.Г., Назаров А.М., Захарьева О.В., Блинков А.П. Гидроакустический модем СПбГМТУ – сравнение с конкурентами.....	199

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Никитин Н.В. Оптимизация скорости и курса судна в штормовых условиях.....	209
Бурюлин Я.В. Подводное автономное подруливающее устройство как способ обеспечения проводки судна в стесненных условиях	216
Даргис Е.А., Кузнецова Е.Ю., Латухов С.В., Поляков А.В. Геоэкологическое управление морехозяйственными комплексами акваторий Северного морского пути.....	223

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Грушун А.И., Грушун Т.А., Осадченко А.Е. Параметрический анализ устойчивости судовых нелинейных систем автоматического управления.....	234
Дементьев К.В., Альчаков В.В., Мирянова В.Н. Навигация автономного подводного аппарата с помощью объединения датчиков методом разнесенного приема при отсутствии угла пеленга.....	241
Заслонов В.В. К вопросу о применении существующих конструкций автоматизированных швартовых устройств в автономном судовождении.....	251

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

Тимохин В.М., Теджетов В.А. Квантово-механический подход к эффекту туннелирования и трансляционной диффузии протонов в кристаллических материалах.....	259
Таранцев А.А., Маринов М.Л., Коновалов И.Н. О способе моделирования пожаровзрывоопасных ситуаций на паромовых и плавучих автостоянках с использованием цепей Маркова.....	270
Маламанов С.Ю., Павловский В.А. О генерации электрического поля, вызванной круговым движением проводящей среды.....	276
Чебан Е.Ю., Лукина Е.А., Кожевников А.И., Капустин И.А., Никущенко Д.В. Исследование взаимного влияния корпуса маломерного судна и измерительной аппаратуры с использованием численного моделирования полей скорости.....	282
Малыгин И.Г., Цыганов В.В. Комплекс моделей стратегического управления развитием Северного морского пути и транспортной инфраструктуры Российской Арктики.....	292

CONTENTS	page
DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS	
Artem A. Vasiliev, Kirill D. Ovchinnikov Analysis of design characteristics of ice-class supply vessels with alternative energy sources.....	11
Vladimir N. Tryaskin, Irina V. Dekhtyar, Sergey N. Ryumin Geometrical and structural modeling in the problems of designing transverse corrugated bulkheads of bulk carriers.....	20
Anatolij P. Anosov, Sergej V. Antonenko, Viktoriya O. Bessonova, Anna A. Vorob'eva Water resistance to the movement of small vessels with simplified hull lines.....	31
Igor G. Maligin, Igor V. Gurlev Innovative technologies in the development of maritime transport.....	41
THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS	
Evgeny P. Burakovskiy, Pavel E. Burakovskiy, Andrey V. Verevochkin, Vyacheslav M. Yusyp Development of a new shape of the bow end of the vessel to improve navigation safety in stormy conditions.....	51
Egor V. Shapkov, Nikita V. Tryaskin, Alexander V. Andryushin Analysis of auger propulsor performance in water.....	59
Andrey M. Maevskiy Prediction of movement routes of marine unmanned transport objects in real navigation conditions based on a characteristic model of the global current field.....	66
TECHNOLOGY OF SHIP BUILDING. SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Sergey A. Rusanovskiy, Mikhail P. Khudyakov, Pavel S. Kovin Modelling technique of the opening's bevel in underwater shipbuilding hulls objects for welding flanges Part 4 Experimental research of the method applicability.....	73
Yuri P. Kuznetsov, Alexander B. Tchuvaikov, Roman A. Pogodin, Sergey N. Khrunkov, Artem A. Kraynov Matching the parameters of the air supply hose with the characteristics of the pneumatic machine drive.....	81
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Minas A. Minasyan, Armen M. Minasyan Method of designing hyperbolic rope couplings "MAMSar".....	89
Minas A. Minasyan, Armen M. Minasyan Method for static testing of MAMSar vibration isolators with elastic elements from steel rope and polymer composite material as vibration isolating couplings.....	97
Sofya S. Gonyaeva, Vyacheslav V. Kozhemyakin, Vladimir O. Kozhemyakin, Nikita A. Morozov, Sofya A. Nikolaeva, Anastasia V. Apollova Emergency core cooling systems.....	105
Alexander P. Petrov, Ivan. I. Kostylev, Grigorij. E. Zhivljuk To risk assessment of operation of power plants of unmanned vessels.....	110
Evgeny I. Popov, Vladimir A. Nekrasov, Alexander V. Fomin Overview of methods for regulating hydraulic resistances.....	123
Vyacheslav V. Kozhemyakin, Nikita A. Morozov, Yuliya I. Rayevskaya, Dmitriy P. Levsha Influence of operating parameters on the static characteristics of the propulsion injector.....	129
Boris I. Rudnev, Olga V. Povalikhina Evaluation of power influence parameters of radiation flame on local radiative heat transfer in marine diesels combustion chamber.....	135
Boris I. Rudnev, Olga V. Povalikhina Appliance of radiative heat flux and device for its installation in cylinder cap of marine high speed diesel.....	142
Anastasia V. Apollova, Anna K. Romanovskaya Optimization of turbine sampling points using a steam turbine plant model in simulation environment SIMINTECH.....	147
Vladimir A. Turkin, George V. Ignatenko, Vladimir V. Belyaev, Sergey S. Zubko, Aleksey I. Kraevoy Adsorption purification of exhaust gases from ship power equipment.....	153
SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING	
Vadim V. Astrein, Sergey I. Kondratiev, Anastas L. Boran-Keshishyan, Liudmila B. Astreina, Viktor I. Filatov Analysis of AIS information and models for constructing spatio-temporal algorithms for predicting vessel traffic.....	159
Van N. Le, Andrey L. Ronzhin Review of intelligent control systems and robotic tasks in aquaculture production.....	171

Marin L. Marinov, Dmitriy A. Skorokhodov, Valery Yu. Kaminsky Systemic principles of ensuring environmental safety of the Northern Sea Route transport system.....	181
Leonid A. Krasnodubets, Svetlana A. Koneva, Vladimir M. Tsaloev The vertical movement control of an autonomous diving buoy in the hydrostatic pressure field of an ocean stratified environment.....	191
Anna A. Tuzova, Andrei G. Kuznetsov, Andrei M. Nazarov, Ol'ga V. Zahar'eva, Aleksey P. Blinkov Hydroacoustic modem of SMTU - comparison with competitors.....	199
AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS	
Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov, Nikolai V. Nikitin Optimization of the ship's speed and course in stormy conditions.....	209
Yaroslav V. Burylin Underwater autonomous thruster as a way to navigate a vessel in confined waters..	216
Evgeniy A. Dargis, Elena Y. Kuznetsova, Sergey V. Latukhov, Alexander V. Polyakov Geoecological management of marine complexes in the waters of the Northern Sea Route.....	223
COMPUTER MODELING AND DESIGN AUTOMATION	
Andrey I. Grushun, Tatiana A. Grushun, Alexander E. Osadchenko Parametric analysis of stability of ship nonlinear automatic control systems.....	234
Kirill V. Dementiev, Vasiliy V. Alchakov, Vera N. Miryanova Autonomous underwater vehicle navigation via sensors maximum-ratio combining in absence of bearing angle.....	241
Vladimir V. Zaslonov To the question of using existing design automated mooring devices in autonomous navigation.....	251
MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES	
Viktor M. Timokhin, Valentin A. Tedzhetov Quantum-mechanical approach to the tunneling effect and translational diffusion of protons in crystalline materials.....	259
Alexander A. Tarantsev, Marin L. Marinov, Ivan N. Konovalov On the method of modeling fire and explosive situations on ferries and floating parking lots using Markov chains.....	270
Stepan Y. Malamanov, Valery A. Pavlovsky On the generation of an electric field caused by the circular motion of a conducting medium.....	276
Egor Yu. Cheban, Evgeniya A. Lukina, Artur I. Kozhevnikov, Ivan A. Kapustin, Dmitry V. Nikushchenko Investigation of the hydrodynamic impact between scientific boat hull and measuring equipment on a basis of numerical modeling of velocity fields.....	282
Igor G. Malygin, Vladimir V. Tsyganov A complex of models for strategic management of the Northern Sea Route and transport infrastructure of the Russian Arctic.....	292

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS

Научная статья

УДК 629.5.01

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.001>

Анализ проектных характеристик судов снабжения ледового класса при применении альтернативных источников энергии

Васильев А.А.¹ A1222V@yandex.ru, Овчинников К.Д.¹ ovchinnikov_kd@mail.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В работе приведены результаты анализа возможности применения на судах снабжения ледового класса альтернативных источников энергии: сжиженный природный газ, полностью аккумуляторная энергетическая установка и водородные топливные элементы. Актуальность работы связана с ужесточением норм выбросов вредных веществ в атмосферный воздух, которое заставляет судовладельцев рассматривать применение альтернативных, более чистых в эксплуатации источников энергии. Была проведена начальная разработка проекта классического судна снабжения (с функциями заводчика якорей) ледового класса Arc6 deadweight 2700 т и мощностью ~14 МВт, работающего на дизельном топливе, которая использовалась как база для анализа возможности применения альтернативных источников энергии. В результате рассмотрения сжиженного природного газа в качестве основного топлива показано, что уменьшается грузоподъемность судна и ухудшается компоновка в связи с необходимостью размещения цистерн запаса увеличенного объема. Использование полностью аккумуляторной энергетической установки для рассматриваемого проекта невозможно ввиду больших требуемых масс аккумуляторных батарей. Использование водородных топливных элементов, вероятно, потребует серьезного изменения архитектурно-конструктивного типа судна, особенно в связи с увеличением объем криогенных цистерн запаса жидкого водорода, но, очевидно, является перспективным направлением, которое, в свою очередь, требует проведения большого количества научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Ключевые слова: судно снабжения, ледовый класс, сжиженный природный газ, СПГ, аккумуляторные батареи, полностью электрическое судно, водородные топливные элементы.

Для цитирования: Васильев А.А., Овчинников К.Д. Анализ проектных характеристик судов снабжения ледового класса при применении альтернативных источников энергии. Морские интеллектуальные технологии 2024. № 1 часть 1, С. 11—19. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.001

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.001>

Analysis of design characteristics of ice-class supply vessels with alternative energy sources

Artem A. Vasiliev¹ A1222V@yandex.ru, Kirill D. Ovchinnikov¹ ovchinnikov_kd@mail.ru

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The paper presents the results of an analysis of the possibility of development ice-class supply vessels with alternative energy sources, such as liquefied natural gas, Li-ion batteries (a fully electric vessel) and hydrogen fuel cells. The relevance of the work is related to the tight standards for atmospheric air emissions, which forces shipowners to consider the use of alternative energy sources that are cleaner to operate. Initial design of a classic supply vessel (with anchor handling tug functions) with ice class Arc6, a deadweight of 2700 tons and a power of ~14 MW powered by diesel fuel is developed for uses as a basis for analyzing the possibility of using alternative energy sources. It shows that usage of liquefied natural gas as the main fuel decreases vessel's cargo capacity and deteriorates general arrangement due to necessary to accommodate large storage tanks. The development of fully electric ice-class supply vessel is impossible due to the large required mass of Li-ion batteries. The usage of hydrogen fuel cells leads to serious changes in the vessel's architecture, especially due to large liquid hydrogen storage tanks. However it is promising direction, which requires a large amount of research and development works.

Keywords: supply vessel, ice class, liquefied natural gas, LNG, batteries, fully electric vessel, hydrogen fuel cells.

For citation: Artem A. Vasiliev, Kirill D. Ovchinnikov. Analysis of design characteristics of ice-class supply vessels with alternative energy sources Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 11—19. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.001

Введение

Наибольшую популярность на мировом рынке энергетических ресурсов в настоящее время имеют нефтепродукты и природный газ, занявшие

важнейшую позицию в мировой экономике и геополитике. По данным, опубликованным в 2019 г в журнале «Энергетическая политика», запасы российской зоны составляют: нефти – 7.3 млрд тонн, природного газа – около 55 трлн кубометров [1].

Ресурсный потенциал Арктической зоны, по данным Минэнерго по состоянию на 2019 г, составлял более 35 млрд тонн нефти и 210 трлн м³ газа [2].

В связи с истощением материковых запасов ископаемых источников топлива, нефтегазодобывающие компании все чаще обращают внимание на шельфовые месторождения. Потепление в Арктике и уменьшение ледяного покрова являются дополнительным стимулом для активного освоения северных морских месторождений. По данным Росгидромета в течение последних тридцати лет (1990–2019 гг) рост среднегодовой температуры в Арктике составил около 2.43 °С, а в районах морей Северного Ледовитого океана – от 2.31 °С до 4.74 °С [3], что превышает уровень потепления на планете в целом почти в два раза.

В освоении шельфовых месторождений суда снабжения играют одну из ключевых ролей. Основными их обязанностями является круглогодичное снабжение для непрерывной эксплуатации нефтегазовые объекты: бурового раствора, сыпучих грузов, метанола, генеральных грузов на открытой палубе и т.д. Кроме того, суда обеспечивают технологическую и экологическую безопасность и несут аварийно-спасательное дежурство.

Сегодня общая мировая тенденция неуклонно стремится к ужесточению региональных правил по предотвращению загрязнения атмосферного воздуха. Единственная организация, имеющая юридическую силу в масштабах всей отрасли, в которой приняты меры по сокращению загрязнения окружающей среды с судов, является международная морская организация (далее – IMO) [4]. В приложении 6 части МАРПОЛ представлены допустимые пределы содержания серы в топливе, которое может использоваться для работы судовых двигателей, показанные в табл. 1 [4].

Таблица 1
Пределы содержания серы в топливе

Регион	2000	2010	2012	2015	2020
Глобальный	4.5%	-	3.5%	-	0.5%
Зоны контроля выбросов SO	1.5%	1%	-	0.1%	-

В январе 2016 г. начали действовать нормы выброса оксидов азота (NOx) для дизельных энергетических установок новых судов по стандарту IMO Tier III в зонах контроля (NECA-побережье США и Карибский бассейн). С января 2021 г. эти же требования обязательны к исполнению для Балтийского и Северного морей, включая проливы.

В связи с ужесточением требований судовладельцы вынуждены переходить на альтернативные источники энергии. В настоящей работе выполнены проектные проработки судов снабжения высокого ледового класса с различными вариантами главного топлива: дизельное топливо, сжиженный природный газ (далее – СПГ), аккумуляторные батареи (далее – АКБ) и водородные топливные элементы (далее – ВТЭ). Рассмотрены только проектные вопросы реализации указанных источников энергии на судах снабжения

высокого ледового класса без учета экономических и логистических вопросов.

1. Современное состояние проблемы

С увеличением нагрузки в зоне основных транспортных путей и активным освоением природно-ресурсного потенциала Арктической зоны, тенденция к ужесточению правил по предотвращению загрязнения атмосферного воздуха в регионе будет лишь возрастать.

В работе [5] рассмотрены основные экологические аспекты освоения природно-ресурсного потенциала Арктической зоны Российской Федерации. Кратко на некоторых примерах описано пять аспектов: увеличение индустриальной нагрузки в зоне основных транспортных путей, накопленный экологический ущерб, деградация многолетнемерзлых пород, возникновение воронок газового выброса, мониторинг выноса речными стоками.

Флот снабжения играет немаловажную роль в освоении шельфовых месторождений, поэтому важно уже сейчас искать эффективные способы снижения токсичности отработавших газов – выбросов оксидов азота и оксидов серы.

Несмотря на большое количество вредных выбросов от сжигания тяжелого дизельного топлива, оно является самым распространённым топливом для судовых энергетических установок. В статье «Экономическая оценка потерь от введения запрета на использование и перевозку тяжелого топлива как топлива для судов в арктических водах» [6] приведена оценка экономических потерь, которые возникнут у судовладельцев, грузоотправителей, грузополучателей и третьих лиц в случае введения обсуждаемого в настоящее время Международной морской организацией запрета на использование и перевозку в качестве топлива тяжелого судового топлива в арктических водах. Показано, что хотя запрет не окажет критического влияния на арктическое судоходство, потери от его введения составят порядка 5 млрд рублей единовременно и 30 млрд рублей ежегодно (за счет удорожания топлива) и не будут скомпенсированы снижением рисков разливов ввиду того, что благодаря уже применяемым мерам безопасности разливы тяжелого топлива как минимум с 2006 года отсутствуют, а ежегодная доля гибели судов в акватории СМП не превышает 0.04 %, что меньше аналогичного показателя мирового флота примерно в 10 раз. Кроме того, запрет повлечет за собой ускорение специализации флота и превращение Арктики в более закрытый для неспециализированных судов регион.

В результате активной позиции Российской Федерации в IMO введение запрета, продвигаемое рядом государств и неправительственных организаций, было отложено на 7 лет [7]. Условия запрета смягчены с целью минимизации негативных последствий для населения и экономики Российской арктической зоны при понимании, что необходимый уровень защиты морской среды будет обеспечиваться благодаря комплексным мерам, применяемым Российской Федерацией в Арктике.

Несмотря на смягчение ограничений, на использование тяжелого топлива на судах в

арктических водах для Российской Федерации, необходимо уже сейчас искать решения по снижению вредных выбросов в атмосферу.

Существуют довольно резкие предложения по переходу с тяжелого топлива на биотопливо [8]. Исследования различных характеристик судовых дизельных установок при использовании биотоплива различного происхождения и его смесей в разных пропорциях с дизельным топливом показали значительное снижение практически всех видов выбросов. Однако одними из главных недостатков, преграждающим активное использование биотоплива, являются высокая стоимость его производства и низкая продолжительность «жизни».

Наиболее популярными решениями экологических требований являются переход на СПГ, применение скрубберов (газоочистителей), переход на топливо с меньшим содержанием серы и частичная гибридизация энергетической установки с применением АКБ.

СПГ, как энергоноситель для транспортных средств, имеет ряд преимуществ: он дешевле нефтяного топлива при более высокой объемной теплоте сгорания. Также природный газ является наиболее надежным и чистым заменителем нефтяного топлива на текущий момент.

Фирмы-производители судовых двигателей массово предлагают двухтопливные судовые двигатели, в состав моторного топлива которых входят природный газ (90 ÷ 99 %) и дизельное топливо (1 ÷ 10%), как запальное [9, 10, 11, 12].

У применения СПГ есть серьезные недостатки: отсутствие развитой системы бункеровки, то есть необходимость создания более сложной инфраструктуры [13], и высокие требования законодательства Российской Федерации к местам расположения емкостей хранения СПГ. В работе [14] сделана оценка возможностей и перспектив использования СПГ в качестве судового топлива для организации пассажирских и грузовых перевозок в Арктической зоне Российской Федерации как возможная альтернатива замены мазута.

Альтернативой доставки СПГ на больших газовозах может стать доставка в криогенных цистернах на автовозах [15].

Применение скрубберов позволяет судовладельцу оставаться на наиболее распространенном судовом топливе, однако влечет и негативные последствия: высокая стоимость установки и обслуживания, а также большие требуемые объемы [16].

Применение АКБ в качестве основного источника электроэнергии также может существенно снизить количество вредных выбросов. В особенности это может быть актуально на судах с системами электродвижения.

Одним из самых экологически чистых, а также перспективных источников энергии на сегодня является водород. Он сам по себе и продукт его горения в виде водяного пара не токсичны, однако, в процессе пламенного горения водорода, как и при горении ископаемого топлива, могут выделяться оксиды азота NOx, которые имеют токсическое действие. Тем не менее, при сгорании водорода не выделяются парниковые газы. Следует отметить, что переходу на ВТЭ уже положено начало на небольших судах [17].

В настоящей работе представлены результаты первичных проектных проработок судна снабжения (с функциями заводчика якорей) ледового класса Arc6 дедевейтом 2700 т и мощностью ~14 МВт, работающего на классическом дизельном топливе, на СПГ, оборудованного полностью электрической энергетической установкой с питанием от АКБ или от ВТЭ.

2. Проект судна на дизельном топливе

2.1. Водоизмещение и главные размерения

В результате расчетов проектируемое судно имеет следующие основные характеристики:

- водоизмещение $D = 6802$ т,
- длина наибольшая $L_{\max} = 87.8$ м,
- длина между перпендикулярами $L_{pp} = 77.8$ м,
- ширина $B = 19.7$ м,
- осадка $T = 7.35$ м,
- высота борта $H = 9.1$ м.

2.2. Главная и вспомогательная энергетическая установка

Основными критериями потребной мощности судовой энергетической установки являются:

- движение на чистой воде;
- подрыв якоря объекта обслуживания, буксировка морского объекта.

Мощность СЭУ для подрыва якоря больше, чем для буксировки объекта в наиболее критических расчетных условиях, допустимых по требованиям РМРС [18], поэтому расчет потребной мощности для подрыва якоря зачастую является достаточным условием.

В результате расчетов на судне принят следующий состав энергетической установки суммарной мощностью 13720 кВт:

- два вспомогательных дизельных агрегата 4-22ДГМ по 1500 кВт от производителя ООО «Кингисеппский машиностроительный завод» [19],
- четыре дизельных агрегата в качестве главных двигателей 12Д300 по 2680 кВт от производителя ОАО ХК «Коломенский завод» [20].

К проектируемому судну предъявляются жесткие требования по системе динамического позиционирования (класс не ниже DP-2), поэтому необходимо предусмотреть подруливающие устройства (далее – ПУ). Поскольку заводчики якорей классически не оснащаются винто-рулевыми колонками (далее – ВРК), то на проекте установлено по два ПУ ПУ200ФМ от производителя АО «ЦС «Звездочка» [21] в носу и корме. Суммарная мощность четырех ПУ составляет 4400 кВт.

2.3. Нагрузка масс и проверочные расчеты

Данные по нагрузке масс проектируемого судна представлены в табл. 2. Расчеты выполнены с использованием диссертации Кондратенко А. А. [22].

Таблица 2

Нагрузка масс судна в дизельном варианте исполнения

Раздел нагрузки	Масса, т
Масса металлического корпуса, $M_{ст}$	1804.04
Масса надстройки, $M_{над}$	176.08
Масса ледовых усилений, $M_{лед}$	359.35
Масса оборудования корпуса, $M_{об}$	407.23

Масса судовых устройств, M_{τ}	205.98
Масса энергетической установки, $M_{сэу}$	606.09
Масса электроэнергетической системы, $M_{ас}$	104.16
Масса судовых систем, $M_{сн}$	431.30
Масса специализированных устройств АНТС, $M_{\tau(АНТС)}$	7.62
Водоизмещение порожнем, D_p	4101.85
Масса экипажа, $m_{ак}$	2.08
Масса судовых энергетических запасов, $m_{сэз}$	586
Масса запасов пресной воды, $m_{пр.в}$	218
Масса перевозимого груза, $m_{гр}$	240
Дедвейт DWT	2700
Водоизмещение в полном грузу Σm	6801.85

Суммарная вместимость судна составляет:

1. Грузовместимость $W_{грф} = 3612,2 \text{ м}^3$;
2. Вместимость балластных цистерн $W_{блф} = 2369,3 \text{ м}^3$;
3. Вместимость цистерн судовых энергетических запасов $W_{сэзф} = 565,5 \text{ м}^3$.

Расчеты посадки и начальной остойчивости были выполнены для пяти случаев:

1. С полным грузом и полными запасами;
2. С полным грузом и 10% запасов;
3. В балласте и полными запасами;
4. С полным грузом, а также с 12 якорями, размещенными на верхней палубе и полными запасами;
5. С полным грузом, а также с буровыми трубами, размещенными на верхней палубе и полными запасами.

Остойчивость судна проверена в программе «Диалог-Статик» для всех вариантов нагрузки и по всем критериям, предусмотренным Правилами РМРС (раздел 3 части IV «Остойчивость») [23]. По результатам расчета, для всех вариантов нагрузки дифферент не превышает 0.32 метра, минимальное значение поперечной метацентрической высоты составляет $h_{\min} = 5.21 \text{ м}$.

В результате выполненных расчетов вместимость судна обеспечена, нагрузка судна соответствует расчетным вариантам, требования к посадке обеспечены.

2.4. Чертежи общего расположения

В результате первичной проработки судна разработаны чертежи общего расположения, представленные на рис. 1.

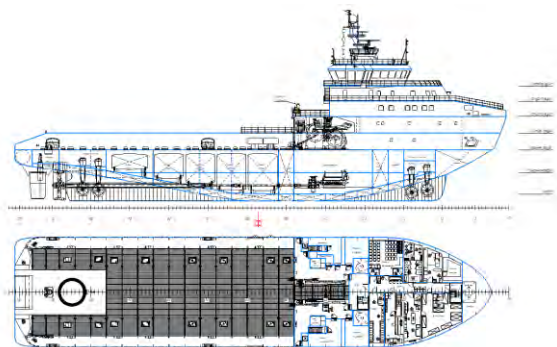


Рис. 1 – Чертежи общего расположения судна снабжения на дизельном топливе

3. Проект судна на СПГ

При проектировании судна, работающего на СПГ, необходимо учесть правила классификации и постройки морских судов п. 9.4 часть IX РМРС. В правилах определены следующие условия работы двухтопливных двигателей (далее – ДТД) [23]:

– п. 9.4.2. Пуск ДТД, работа на задний ход осуществляется только на жидком топливе,

– п. 9.4.3. При работе ДТД на переменных режимах, маневрировании судна, швартовных операциях должно использоваться только жидкое топливо,

– п. 9.4.4. При внезапном прекращении подачи газового топлива ГД должен продолжить работу на жидком топливе без остановки,

– п. 9.4.5. ГД должны быть снабжены датчиками защиты, исключающими одновременную подачу газового топлива и полную подачу жидкого.

В случае если изменение момента, передаваемого на гребной винт, обеспечивается не за счет изменения режима работы главных двигателей, а за счет переменных режимов работы гребных электродвигателей, требования п. 9.4.2 и 9.4.3 части IX Правил классификации и постройки морских судов к ДТД не применимы.

3.1. Выбор ДТД

Исходя из расчета, выполненного ранее, следует, что для проектируемого судна возможно использование ДТД фирмы «Wärtsilä» [24]:

– двух вспомогательных дизельных двигателя 8L20DF по 1410 кВт,

– четырех дизельных двигателя 6L34DF по 2700 кВт в качестве главных двигателей.

Суммарная мощность силовой установки составит 13620 кВт.

3.2. Массы и вместимость цистерн и вспомогательного оборудования

Масса запасов СПГ на ходовом режиме составляет:

$$m_{СПГ} = \left((0.6 \cdot g_{гд}^{гд} \cdot N_{гд} \cdot \tau_{ч}) + (0.6 \cdot g_{гд}^{дг} \cdot N_{дг} \cdot \tau_{ч} \cdot n_{дг}) \right) = 342783.36 \text{ кг},$$

где $g_{гд}^{гд} = 0.1708 \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}$ – удельный расход главного двигателя 6L34DF, $\tau_{ч} = 10 \cdot 24 = 240 \text{ ч}$ – автономность, $g_{гд}^{дг} = 0.190 \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}$ – удельный расход вспомогательного 8L20DF, $n_{дг}$ – количество работающих дизель генераторов.

Определив необходимую массу СПГ, объем цистерн запаса рассчитан по формуле:

$$V_{СПГ} = \frac{m_{СПГ}}{k \cdot \rho_a} \cdot K_{СПГ} = 856.95 \text{ м}^3,$$

где $\rho_a = 0.7 \text{ кг/м}^3$ – плотность газа при атмосферном давлении, $k = 600$ – коэффициент сжимаемости газа, $K_{СПГ} = 1.05$ – коэффициент запаса СПГ.

По результатам расчетов принято решение установить четыре самонесущие цилиндрические цистерны для СПГ от фирмы Quilin Cryogenic Tanks объемом 220 м³ каждая.

Как правило, на ходовом режиме дизельное топливо расходуется для запуска и подогрева ДТД. Кроме того, на ходовом режиме дизельное топливо расходуется как запальное в некой пропорции с природным газом. В данном случае необходимо предусмотреть большее количество дизельного топлива, так как суда снабжения должны переходить на жидкое топливо во время швартовных операций,

операций по перегрузке с борта судна на платформу, а также во время преодоления ледяного покрова набегами, когда набор и сброс мощности главного двигателя происходит менее чем за 20 с. Масса судовых энергетических запасов на ходовом режиме рассчитана по формуле [25]:

$$m_{сэз.х} = \left((0.4 \cdot g_{дт}^{гд} \cdot N_{гд} \cdot \tau_ч) + (0.4 \cdot g_{дт}^{дг} \cdot N_{дг} \cdot \tau_ч \cdot n_{дг}) \right) = 250911.36 \text{ кг},$$

где $g_{дт}^{гд} = 0.189 \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}$ – удельный расход главного двигателя 6L34DF, $\tau_ч = 10 \cdot 24 = 240 \text{ ч}$ – автономность, $g_{дт}^{дг} = 0.203 \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}$ – удельный расход вспомогательного 8L20DF, $n_{дг}$ – количество работающих дизель генераторов.

Масса дизельного топлива на стоянке без грузовых операций рассчитана по следующей формуле [26]:

$$m_{сэз} = (g_{дт}^{дг} \cdot N_{дг} \cdot \tau_ч \cdot n_{дг}) = 12739.04 \text{ кг},$$

где $\tau_ч = 2 \cdot 24 = 48 \text{ ч}$.

По результатам расчетов приняты следующие решения:

- установить регазификатор Р100-33 от фирмы «Thermax» производительностью газа 3300 м³/ч при атмосферном давлении [27],
- установить по одному криогенному насосу НКпМ12.5/40 от производителя АО «ЛГМ» [28] на каждый танк,
- установить два компрессора низкого давления 60.0S(NQ/P) от фирмы ООО «Судовые системы», (один должен быть резервным) [29],
- установить два компрессора высокого давления КП-1100/350 серии SV от фирмы «Челябинского компрессорного завода» (один из которых должен быть резервным) [30],
- установить два баллона высокого давления от фирмы «Волжский промышленный комплекс» [31] с рабочим давлением 31,4 МПа емкостью 0,8 м³.

Масса дополнительного оборудования ЭУ при переходе на СПГ рассчитана по формуле:

$$M_{ЭУ.СПГ} = M_{сэу} + M_{цсп} + M_{рег} + M_n + M_{кнд} + M_{квд} + M_{вв} = 602.63 + (4 \cdot 25.3) + 0.904 + (4 \cdot 0.106) + (2 \cdot 0.926) + (2 \cdot 0.6) + (2 \cdot 1.66) = 711.53 \text{ т}.$$

3.3. Нагрузка масс и проверочные расчеты

По результатам расчетов нагрузки масс при переходе с дизельного топлива на СПГ масса судовой энергетической установки увеличивается на 105.44 т, масса судовых энергетических запасов – на 40.4 т. Следовательно, масса перевозимого груза снижена на 146.09 т.

Были выполнены аналогичные с первым вариантом проекта расчеты и построения. Рассматривались те же варианты нагрузки.

По результатам расчетов посадки и остойчивости для всех вариантов нагрузки дифферент не превышает 0.24 метра. Минимальное значение поперечной метацентрической высоты составляет $h_{\min} = 5.14 \text{ м}$.

В результате выполненных расчетов вместимость судна обеспечена, нагрузка судна соответствует расчетным вариантам, требования к посадке обеспечены.

3.4. Чертежи общего расположения

В результате первичной проработки судна, работающего на СПГ, разработаны чертежи общего расположения, представленные на рис. 2. С целью сохранения номенклатуры грузовых помещений цистерны СПГ размещены на верхней палубе, что, строго говоря, сильно ограничивает площадь рабочей палубы, а также требует проведения проработки вопросов безопасности судна на следующих стадиях проектирования.

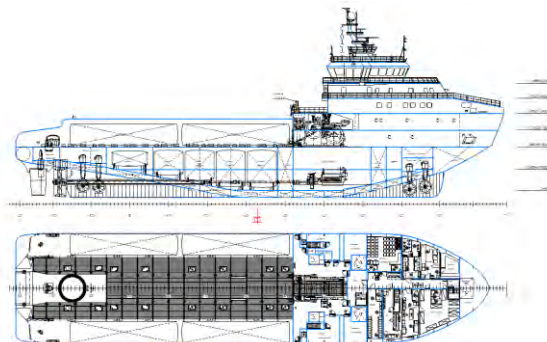


Рис. 2 – Чертежи общего расположения судна снабжения на СПГ

4. Проект судна на АКБ

Для возможности создания судна на АКБ необходимо, чтобы движение судна осуществлялось с помощью электродвигателей. Ранее разработанный проект судна имеет механическую передачу на винт, поэтому необходимо переоборудовать судно с использованием электрических ВРК.

Исходя из расчета мощности, выполненного ранее, для проектируемого судна подходят два электродвигателя ГЭД-7000 от Концерна Русэлпром [32], имеющие следующие характеристики:

- мощность – 7000 кВт,
- частота вращения – 600 об/мин,
- максимальное напряжение – 6000 В,
- КПД – 95 %,
- вес – 35 т.

В качестве источника энергии стоит подобрать литий-ионные АКБ, так как у них высокая плотность энергии и низкий саморазряд, а также они имеют меньшую массу в сравнении со свинцово-кислотными. На сегодняшний день компания ООО «НПК МСА» [33] производит накопители энергии, которые представляют собой металлический шкаф с установленными в нем однотипными перезаряжаемыми литий-ионными батарейными модулями типов МБ-160 или МБ-150. Управление осуществляется с помощью встроенного модуля управления. Накопители энергии типа НЭ-650-160 сертифицированы Российским Морским Регистром Судоходства и имеют следующие характеристики:

- номинальная емкость – 160 А·ч,
- максимальное напряжение – 999 В,
- конечное напряжение при разряде – 881.6 В,
- масса – 1621 кг,
- энергоемкость – 152 кВт·ч (179,3 Вт·ч/л).
- класс защиты IP 44.

Исходя из характеристик электродвигателя, необходимо произвести сборку аккумуляторной

батареи с напряжением 6000 В. Накопители энергии типа НЭ-650-160 имеют максимальное напряжение 999 В, поэтому необходимо последовательно соединить шесть таких накопителей энергии.

Автономность рассчитывается по формуле:

$$n = \text{round} \left(\frac{P \cdot t}{V \cdot k \cdot Q_{\text{ном}}} \right) = 246 \text{ шт.},$$

где $P = 14000$ кВт – нагрузка двух электродвигателей, $V = 5994$ В – напряжение накопителей энергии типа НЭ-650-160; $t = 24$ ч – время работы от аккумулятора; $Q_{\text{ном}} = 0.16$ кА · ч – номинальная емкость батареи; $k = 1.428$ – коэффициент использования емкости аккумуляторов.

Соответственно, для обеспечения автономности 24 ч при полной мощности потребуется 1476 накопителей энергии типа НЭ-650-160, масса которых составит 2393 т. С учетом того, что масса топлива для предыдущих вариантов судна составляла не более ~610 т, обеспечивая автономность 10 сут, не говоря уже о требуемых объемах АКБ и сопутствующих систем, обеспечение нормальной эксплуатации судна снабжения с АКБ невозможно. Создание полностью электрической энергетической установки может быть перспективно лишь на судах либо с небольшой мощностью СЭУ, либо с малой автономностью.

5. Проект судна на ВТЭ

Использование водорода в транспортном секторе осуществляется с применением топливных элементов. Для коммерческого применения лучше всего подходят твердо-полимерные топливные элементы, которые, в свою очередь, очень капризны к качеству топлива.

Принцип работы водородного топливного элемента довольно простой: водород высвобождает электроны, которые затем реагируют с кислородом для производства электроэнергии, оставляя в качестве побочного продукта реакции только водяной пар. На судне данная система будет работать следующим образом: ВТЭ преобразуют водородное топливо, поступающее из криогенных установок, содержащих сжиженный водород, в электрическую энергию. Получаемый на выходе электрический ток питает гребные электродвигатели, а также все основные судовые устройства и системы. Таким образом, судно на ВТЭ будет аналогично судну на АКБ, но энергоносителем будут не АКБ, а сжиженный водород.

Реализацию применения водородных топливных элементов уже сегодня можно видеть на судах: Energy Observer, Hydrobingo, SEA CHANGE. Россия также работает в направлении применения водородной энергетики на судах. Так 28 февраля 2023 года заложено экспериментальное судно, использующее технологию водородных топливных элементов. Судно проекта 00393 разработано по проекту ЦКБ «Балтсудопроект» [34]. В то же время компания Sitronics Group уже провела первичные испытания судна, оборудованного водородными топливными элементами [35].

Американская компания Ballard Power Systems [36] производит сверхмощные силовые модули FCwave, испытанные в условиях работы в морской среде, с характеристиками:

- мощность 200 кВт,

- напряжение 660 В,
- сила тока 300 А,
- размеры 1209x741x2195 мм,
- масса 1000 кг,
- тип охлаждения – водяное,
- уровень защиты IP44.

Исходя из характеристик ВРК, необходимо произвести сборку водородных топливных элементов с напряжением 6000 В и силой тока 2350 А. Топливный элемент имеет напряжение 660 В, поэтому необходимо последовательно соединить девять элементов, которые параллельно соединяются восемь раз. Масса всех топливных элементов для питания двух ВРК без учета водяного охлаждения будет составлять 72 т.

Водород является очень неэнергоемким топливом: для достижения энергоемкости 1 л бензина требуется 3.73 л жидкого водорода [37]. Плотность жидкого водорода очень низкая и составляет ~0.07 т/м³. Если считать бензин и мазут примерно равными по энергоемкости видам топлива, то при переходе с мазута на жидкое водородное топливо масса судовых энергетических запасов сократится примерно в 3.6 раз. Требуемый объем криогенных цистерн, при этом, должен быть в 3.7 раз больше аналогичных цистерн судового дизельного топлива.

Дополнительно на судне необходимо предусмотреть АКБ, которые будут аккумулировать лишнюю электроэнергию от топливных элементов, ввиду особенностей работы ВТЭ.

Реальная оценка масс судовой энергетической установки и топливной системы сильно затруднена, так как отсутствует массовое производство этих систем. На сегодняшний день все подобные разработки сильно привязаны к конкретному проекту, и делаются под него.

В результате можно сделать вывод, что имеется теоретическая возможность создания судна снабжения ледового класса, работающего на ВТЭ, однако сама разработка требует выполнения объемных и долговременных сопутствующих НИР и НИОКР в данном направлении, что вероятно повлечет за собой большие изменения в архитектурно-конструктивном типе этих судов.

Заключение

В результате выполненной работы получены следующие выводы:

- наиболее грузоподъемный и реализуемый вариант судна снабжения высокого ледового класса получен при классической энергетической установке – двигатель внутреннего сгорания, работающий на дизельном топливе,
- при проработке варианта перехода на СПГ с использованием ДТД (ряд операций судна снабжения нельзя выполнять на СПГ) уменьшается грузоподъемность судна на ~150 т и ухудшается компоновка проекта в связи с необходимостью обеспечения больших объемов для размещения цистерн запаса в связи с малой плотностью СПГ. В данной проработке в первом приближении цистерны размещены на рабочей палубе, что, скорее всего, не будет одобрено надзорными органами. Вероятно, архитектурно-конструктивный тип судна снабжения высокого ледового класса придется откорректировать для обеспечения рационального

расположения цистерн СПГ и безопасной эксплуатации судна,

- переход на полностью аккумуляторную энергетическую установку для судна снабжения высокого ледового класса в связи с большой требуемой мощностью невозможен,

- использование ВТЭ выглядит перспективным, однако очевидно, что в связи с еще меньшей

плотностью жидкого водорода, необходимостью установки криогенных цистерн, а так же обеспечения безопасности мореплавания архитектурно-конструктивный тип судна будет сильно изменен, а сама разработка подобного проекта требует проведения большого количества НИР и НИОКР.

Литература

1. Кобылкин Д.Н. Ресурсы арктического шельфа – это наш стратегический запас. «ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА» №3(141), ноябрь 2019.
2. Сафонова Т.Ю. Перспективы российской нефтегазодобычи в Арктике: от обвала до развития // Креативная экономика. — 2020. — Том 14. — № 10. — С. 2569-2590. Co1: 10.18334/ce.14.10.111085.
3. Жилина И.Ю. Потепление в Арктике: возможности и риски // Экономические и социальные проблемы России. - Москва, 2021. - № 1. -С. 66-87.
4. MARPOL ANNEX VI. <https://www.marpol-annex-vi.com> (дата обращения: 24.11.2023).
5. Брехунцов А. М., Петров Ю. В., Прыкова О. А. Экологические аспекты развития природно-ресурсного потенциала российской Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 3 (39). — С. 34—47. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-34-47.
6. С.В. Ганеева, М.И. Крупин, Б.Р. Оглы Новрузов, А.В. Сафронов. Экономическая оценка потерь от введения запрета на использование и перевозку тяжелого топлива как топлива для судов в арктических водах // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. - 2020. - №58/59. - С. 11-18.
7. С.А. Толмачев. Запрет на использование тяжелого топлива на судах в Арктике – итоги работы ИМО // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. - 2021. - №62/63. - С. 6-13.
8. Г.В. Черкаев, Е.А. Чихонадских. Возможности для выращивания водорослей для производства судовых биотоплив в России // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. - 2022. - №68/69. - С. 92-96.
9. Дорохов А. Ф., Апкаров И. А., Хоан Коанг Лыонг Особенности применения газообразных топлив в судовых энергетических установках. Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2012. № 2. — С. 70—75.
10. Кристен К. IMOTier 3: газовые и двухтопливные двигатели — экологически чистое и эффективное решение (материалы конгресса CIMAC 2013) / К. Кристен, Д. Бранд // Двигателестроение. — 2013. — № 4. — С. 42—56
11. Electronically controlled dual fuel two stroke engines S70ME-C10.5-GI-TII. Project guide. – Denmark: – Man B&W, 2018. – 436 p
12. WÄRTSILÄ 20DF. Product guide. – Finland: – Wärtsilä, 2016. – 176 p.
13. Луцкевич А. М., Крестьянцев А. Б. СПГ – бункеровщик родом из Петербурга / Журнал – портный. портовый сервис, 2017. — № 1 (25). — С. 74—77.
14. «Перспективы и возможности использования СПГ для бункеровки в Арктических регионах России» / А. Ю. Климентьев, А. Ю. Книжников; Всемирный фонд дикой природы (WWF). – М., 2018 – 48 с.
15. М.В. Власьев. Определение характеристик системы доставки газового топлива автоцистернами для бункеровки судов в порту // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. - 2020. - №60/61. - С. 37-48.
16. Eelco D. B., Maarten H. Scrubber. An economic and ecological assessment. – Assessment. – Delft: NABU, 2015. – 45 p.
17. Marine News' Top Boats of 2021. <https://www.marinelink.com/news/marine-news-top-boats-492294> (дата обращения 24.11.2023).
18. Vryhof anchors. Anchor manual 2010. Vryhof anchors B.V., Capelle a/d Yssel, The Netherlands 2010.
19. Русский дизель. <https://kmz1.ru/company/produkti/dvigateli-razmernosti-23-2kh30-russkiy-dizel-moshchnostyu-ot-3-45-do-8-mvt.html> (24.11.2023).
20. Коломенский завод. <https://www.kolomnadiesel.com/> (дата обращения: 23.11.2023).
21. «НПО «Винт». <https://vintpo.ru/products> (дата обращения: 09.12.2022).
22. Кондратенко А. А. Оптимизация судов снабжения нефтегазодобывающих платформ для работы на чистой воде и в ледовых условиях. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб: 2018. 152 с.
23. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства, 2023.
24. WÄRTSILÄ. <https://www.wartsila.com/> (дата обращения: 09.12.2022).
25. Каштелян В. И., Рывлин А. Я., Фаддеев О. В., Ягодкин В. Я. Ледоколы. Л.: Судостроение, 1972. 287 с.
26. Аунг П.П. Сравнительный анализ способов снижения вредных выбросов в окружающую среду с выпускными газами на танкерах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб: 2019. 171 с.
27. Vaporizer. <https://www.chartindustries.com/Products/Vaporizers> (дата обращения: 10.09.2023).
28. Каталог продукции АО «ЛГМ». <http://www.aolgm.ru/catalog.html> (дата обращения: 10.11.2023).
29. Винтовые компрессоры низкого давления. <http://shipsystems.spb.ru/vintovye-kompressory-nizkogo-davleniya.html> (дата обращения: 23.11.2023)
30. Поршневые компрессорные установки и дожимные компрессоры. <https://www.chkz.ru/catalog/reciprocating-compressors-and-booster-compressors/> (дата обращения: 22.11.2023).

31. Баллон большого объема 800 литров ГОСТ 12247–80. http://www.vpk-vlz.ru/ballony-bolshogo-ob_ema-800l-gost-1/ (дата обращения: 21.11.2023).
32. Русэлпром. <https://www.ruselprom.ru/> (дата обращения: 24.11.2023).
33. МСА. <https://unicont.com/> (дата обращения: 24.11.2023).
34. В России построят экспериментальное судно на водородном топливе. <https://www.vedomosti.ru/society/articles/2023/03/06/965438-v-tatarstane-stroitsya-eksperimentalnoe-sudno> (дата обращения: 24.11.2023).
35. Sitronics Group провела испытания первого в России прототипа электросудна на водородном топливе. https://www.korabel.ru/news/comments/sitronics_group_provela_ispytaniya_pervogo_v_rossii_prototipa_elektrosudna_na_vodorode.html (дата обращения 01.11.2023).
36. Ballard Power Systems. <https://www.ballard.com/> (дата обращения: 23.11.2023).
37. Полякова Т.В. Состояние и перспективы развития водородной энергетики. Вестник МГИМО-Университета. 2012. № 1 (22). С. 156-164.

References

1. Kobylkin D. N. Resursy arkticheskogo shelfa — eto nash strategicheskij zapas [Arctic shelf resources are our strategic reserve]. Energeticheskaya politika №3(141), November 2019. (in Russian).
2. Safonova T.Yu. (2020) Perspektivy rossiyskoy neftegazodobychi v Arktike: ot obvala do razvitiya [Prospects for Russian oil and gas production in the Arctic: from collapse to development]. Kreativnaya ekonomika. 14. (10). — 2569-2590. doi: 10.18334/ce.14.10.111085. (In Russian).
3. Zhilina I.Yu. Warming in the Arctic: opportunities and risks // Economic and Social Problems of Russia. - Moscow, 2021. - N 1. - С. 66-87. (In Russian).
4. MARPOL ANNEX VI. <https://www.marpol-annex-vi.com> (24.11.2023).
5. Brekhuntsov A. M., Petrov Yu. V., Prykova O. A. Ecological aspects of the development of the natural resource potential of the Russian Arctic. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 3 (39), pp. 34—47. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-34-47. (In Russian).
6. S.V. Ganeeva, M.I. Krupin, B.R. Ogly Novruzov, A.V. Safronov. Economical assessment of financial losses resulting from the ban on use and carriage of heavy fuel oil for ships in the Arctic. Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. 2020, No. 58/59, pp. 11-18. (In Russian).
7. S.A. Tolmachev. Ban on the use of heavy fuel oil on ships in the Arctic outcome of IMO work. Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. 2021, No. 62/63, pp. 6-13. (in Russian).
8. G.V. Cherkaev, E.A. Chikhonadskikh. Perspectives of growing algae for the production of marine biofuels in Russia. Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. 2022, No. 68/69, pp. 92-96. (in Russian).
9. Dorokhov A.F., Apkarov I.A., Hoang Quang Luong Osobennosti primeneniya gazoobraznykh topliv v sudovykh jenergeticheskikh ustanovkakh [Features of the use of gaseous fuels in ship power plants]. Vestnik AGTU. Ser.: Morskaja tehnika i tehnologija. 2012. № 2. (in Russian).
10. Kristen K., Brand D. IMOTier 3: gazovye i dvuhtoplivnye dvigateli — jekologicheskij chistoe i jeffektivnoe reshenie (materialy kongressa CIMAC 2013) [IMOTier 3: gas and dual-fuel engines - an environmentally friendly and efficient solution (materials of the CIMAS Congress 2013)]. Dvigatelsestroenie. — 2013. — № 4. (in Russian).
11. Electronically controlled dual fuel two stroke engines S70ME-C10.5-GI-TII. Project guide. — Denmark: — Man B&W, 2018. — 436 p.
12. WÄRTSILÄ 20DF. Product guide. — Finland: — Wärtsilä, 2016. — 176 p.
13. Luckevich A. M., Krest'jancev A. B. SPG — bunkerovshhik rodом iz Peterburga [LNG bunker vessel from St. Petersburg]. Portnews (portnews.ru). 2017. — № 1 (25). (in Russian).
14. Klimentev A. Ju., Knizhnikov A. Ju. Perspektivy i vozmozhnosti ispol'zovaniya SPG dlja bunkerovki v Arkticheskikh regionah Rossii [Prospects and possibilities for using LNG for bunkering in the Arctic regions of Russia]. Vsemirnyj fond dikoj prirody (WWF). — M., 2018 (in Russian).
15. M.V. Vlasiev. Selection of the optimal number of tank trucks and characteristics of system for delivery of gas fuel to ships. Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. 2020, No. 60/61, pp. 37-48. (in Russian).
16. Eelco D. B., Maarten H. Scrubber. An economic and ecological assessment. — Assessment. — Delft: NABU, 2015. — 45 p.
17. Marine News' Top Boats of 2021. <https://www.marinelink.com/news/marine-news-top-boats-492294> (24.11.2023).
18. Vryhof anchors. Anchor manual 2010. Vryhof anchors B.V., Capelle a/d Yssel, The Netherlands 2010.
19. Russian diesel. <https://kmz1.ru/company/produkti/dvigateli-razmernosti-23-2kh30-russkiy-dizel-moshchnostyu-ot-3-45-do-8-mvt.html> (24.11.2023).
20. Kolomensky zavod. <https://www.kolomnadiesel.com/> (24.11.2023).
21. «NPO «Vint». <https://vintnpo.ru/products> (09.12.2022).
22. Kondratenko A. A. Optimizacija sudov snabzhenija neftegazodobyvajushhih platform dlja raboty na chistoj vode i v ledovyh uslovijah [Optimization of supply vessels for oil and gas platforms for operation in clear water and ice conditions]. PhD thesis. SPb, 2018. (in Russian).
23. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Russian Maritime Register of Shipping, 2023.
24. WÄRTSILÄ. <https://www.wartsila.com/> (09.12.2022).
25. Kashteljan V. I., Ryvlin A. Ja., Faddeev O. V., Jagodkin V. Ja. Ledokoly [Icebreakers]. L.: Sudostroenie, 1972. (in Russian).
26. Aung P.P. Sravnitel'nyj analiz sposobov snizhenija vrednykh vybrosov v okruzhajushhiju sredu s vypusknymi gazami na tankerah [Comparative analysis of methods for reducing harmful emissions into the environment from exhaust gases on tankers]. PhD thesis. SPb, 2019. (in Russian).

27. Vaporizer. <https://www.chartindustries.com/Products/Vaporizers> (10.09.2023).
28. JSC "LGM", Our products. <http://www.aolgm.ru/catalog.html> (10.11.2023).
29. Low pressure screw compressors. <http://shipsystems.spb.ru/vintovye-kompressory-nizkogo-davleniya.html> (23.11.2023).
30. Piston compressor units and booster compressors. <https://www.chkz.ru/catalog/reciprocating-compressors-and-booster-compressors/> (22.11.2023).
31. Large volume cylinder 800 liters GOST 12247–80. http://www.vpk-vlz.ru/ballony-bolshogo-ob_ema-800l-gost-1/ (23.11.2023).
32. Ruselprom. <https://www.ruselprom.ru/> (24.11.2023).
33. MCA. <https://unicont.com/> (24.11.2023).
34. V Rossii postrojat jeksperimental'noe sudno na vodorodnom toplive [An experimental vessel powered by hydrogen fuel will be built in Russia]. <https://www.vedomosti.ru/society/articles/2023/03/06/965438-v-tatarstane-stroitsya-eksperimentalnoe-sudno> (24.11.2023). (in Russian).
35. Sitronics Group provela ispytaniya pervogo v Rossii prototipa jelektrosudna na vodorodnom toplive [Sitronics Group tested Russia's first prototype of an electric vessel powered by hydrogen fuel]. https://www.korabel.ru/news/comments/sitronics_group_provela_ispytaniya_pervogo_v_rossii_prototipa_elektrosudna_na_vodorode.html (01.11.2023). (in Russian).
36. Ballard Power Systems. <https://www.ballard.com/> (23.11.2023).
37. Polyakova T. V. Status and Prospects of Hydrogen Energy development. MGIMO Review of International Relations. No 1(22) 2012. <https://doi.org/10.24833/2071-8160-2012-1-22-156-164>. (in Russian).

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Васильев Артем Александрович, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: A1222V@yandex.ru

Artem A. Vasiliev, Department of Ship Design, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: A1222V@yandex.ru

Овчинников Кирилл Дмитриевич, кандидат технических наук, 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 of 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 20.12.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.12.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 25.12.2023.

Научная статья

УДК 629.12.001.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.002>

Геометрическое и конструктивное моделирование в задачах проектирования поперечных гофрированных переборок судов для перевозки навалочных грузов

Тряскин В.Н.¹ vladimir.tryaskin@smtu.ru, Дехтярь И.В.¹ Dekhtyar@smtu.ru,

Рюмин С.Н.¹ rumin@smtu.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Гофрированные переборки нашли широкое применение на судах для перевозки навалочных грузов в связи со снижением трудоемкости процесса зачистки грузовых трюмов от остатков груза и упрощением обслуживания таких конструкций. Проектирование конструкций гофрированной переборки, выполняемое на основе требований Правил МАКО, – сложный итерационный процесс, требующий наличия как необходимых навыков у конструктора, так и специализированного программного обеспечения. В статье рассмотрены методы геометрического и конструктивного моделирования поперечных гофрированных переборок судов для перевозки навалочных грузов при решении задач их проектирования и проверочного расчета с использованием аппарата автоматизированной системы САПР-К. Рассматриваются гофрированные поперечные переборки с вертикальной ориентацией гофров, устанавливаемых как на опоры, так и непосредственно на настил второго дна и верхнюю палубу. Показана общая декомпозиция корпуса судна на отдельные структурные составляющие и декомпозиция главных поперечных гофрированных переборок. Предложены принципы иерархического кодирования элементов конструкций гофрированных поперечных переборок. Рассмотрена последовательность геометрического и конструктивного моделирования структурных составляющих поперечных гофрированных переборок судна для перевозки навалочных грузов и соответствующие интерфейсы программного комплекса САПР-К, в котором реализованы эти задачи.

Ключевые слова: судно для перевозки навалочных грузов, конструкция гофрированной переборки, конструктивная модель, геометрическая модель, декомпозиция, гофрированное полотно, нижний стул, верхний стул, общие Правила МАКО, САПР-К

Финансирование: Исследование выполнено в рамках финансирования программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»

Для цитирования: Тряскин В.Н., Дехтярь И.В., Рюмин С.Н. Геометрическое и конструктивное моделирование в задачах проектирования поперечных гофрированных переборок судов для перевозки навалочных грузов. Морские интеллектуальные технологии 2024. № 1 часть 1, С. 20—30. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.002

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.002>

Geometrical and structural modeling in the problems of designing transverse corrugated bulkheads of bulk carriers

Vladimir N. Tryaskin¹ vladimir.tryaskin@smtu.ru, Irina V. Dekhtyar¹ Dekhtyar@smtu.ru,

Sergey N. Ryumin¹ rumin@smtu.ru

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. Corrugated bulkheads are widely used on ships for the transportation of bulk cargo due to the reduction in the complexity of the process of stripping cargo holds from cargo residues and simplifying the maintenance of such structures. The design of corrugated bulkhead structures, performed on the basis of the requirements of the Common Structural Rules, is a complex iterative process that requires both the necessary skills of the designer and specialized software. The article considers methods of geometric and structural modeling of transverse corrugated bulkheads of bulk carriers in solving problems of their design and verification calculation using the computer-aided system «SAPR-K». Corrugated transverse bulkheads with vertical orientation of corrugations are considered, which are installed both on supports and directly on the inner bottom and the upper deck. The general decomposition of the ship's hull into separate structural components and the decomposition of the main transverse corrugated bulkheads are shown. The principles of hierarchical coding of structural elements of corrugated transverse bulkheads are proposed. The sequence of geometric and constructive modeling of the structural components of the transverse corrugated bulkheads of bulk carriers and the corresponding interface of the computer-aided system «SAPR-K» package are considered.

Keywords: bulk carrier, structure of corrugated bulkhead, structural model, geometric model, decomposition, corrugated panel, lower stool, upper stool, Common Structural Rules, SAPR-K

Financial Support: The research was carried out as part of the financing of the strategic academic leadership program «Prioritet-2030»

For citation: Tryaskin V., Dekhtyar I., Ryumin S. Geometrical and structural modeling in the problems of designing transverse corrugated bulkheads of bulk carriers. Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 20—30. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.002

Введение

В настоящее время на судах для перевозки навалочных грузов (балкерах) нашли широкое применение гофрированные поперечные переборки. Это связано со снижением трудоемкости процесса зачистки грузовых трюмов от остатков груза и с упрощением обслуживания таких конструкций.

Параметры конструктивных элементов судов для перевозки навалочных грузов длиной 90 метров и более должны удовлетворять требованиям Общих Правил МАКО (CSR) [1], которые являются основным нормативным документом для проверки прочности / параметрического проектирования конструкций таких судов. Требования к гофрированным переборкам балкеров также представлены в Правилах Российского морского Регистра судоходства [2].

Правилами МАКО регламентируется значительное количество расчетных случаев загрузки грузовых трюмов судов для навалочных грузов, что обуславливает высокую трудоемкость проектирования конструкций корпуса судна, в том числе и конструкций поперечных переборок. Для решения задач проектирования конструкций на основе требований Правил МАКО требуется наличие специализированного программного обеспечения.

Вопросы проектирования гофрированных переборок рассмотрены в ряде отечественных и зарубежных работ. Теоретические основы проектирования гофрированных переборок были предложены в исследованиях российских ученых, обобщенных в монографии А.Л. Васильева и др. [3]. В работах Санг-Хун Шина (Sang-Hoon Shin) и Дэ-Ин Ко (Dae-Eun Ko) [4,5] рассматривается задача проектирования конструкции гофрированной переборки минимальной массы и оптимальных размеров. В работе Джеролима Андрича (Jerolim Andric), Ведрана Занича (Vedran Zanic) и Мате Гргича (Mate Grgic) [6] исследован вопрос оптимального проектирования конструкций гофрированных поперечных переборок из нержавеющей стали. Джо-Мин Ян (Joe-Ming Yang) и Ченг-Ненг Хванг (Cheng-Neng Hwang) в работе [7] рассмотрели оптимизацию формы гофрированных переборок при помощи генетического алгоритма. Статья Алексашина Д.А., Плотникова К.В., Трякина В.Н. [8] посвящена вопросам проектирования гофрированных поперечных переборок крупнотоннажных навалочных судов с использованием метода обобщенного приведенного градиента.

На кафедре Конструкции и технической эксплуатации судов СПбГМТУ разрабатывается автоматизированная система САПР-К [9], предназначенная для параметрического проектирования конструкций корпуса судов в соответствии с требованиями Правил МАКО и Правил РМРС. Под параметрическим проектированием конструкций понимается процесс определения размеров конструктивных элементов, удовлетворяющих требованиям этих нормативных документов.

Программное обеспечение системы САПР-К обеспечивает решение большинства задач автоматизированной подготовки данных для организации параметрического проектирования конструкций корпуса судна. Задачи геометрического и конструктивного моделирования конструкций

гофрированных переборок следует отнести к наиболее сложным.

Структура системы автоматизированного проектирования определяется набором программных блоков и их взаимосвязью. В состав системы входят:

- блок общепроектных задач;
- блок геометрического моделирования;
- блок конструктивного моделирования;
- блок определения расчетных нагрузок на тихой воде;

- блоки процедур проверки прочности/проектирования конструкций различного иерархического уровня по требованиям к местной прочности, устойчивости, общей прочности, усталостной долговечности;

- блок процедур проектирования конструкций ледовых усилений;

- блок формирования отчетной документации.

В настоящей статье рассмотрены методические основы программного обеспечения автоматизированной системы САПР-К, предназначенного для геометрического и конструктивного моделирования гофрированных поперечных переборок.

Под **геометрическим моделированием** понимается формирование геометрических моделей, описывающих форму и размеры структурных составляющих корпуса судна и их пространственное положение [10]. Формализованное представление геометрической модели – это массив данных, содержащий координаты точек, определяющий форму корпуса и его структурных составляющих в пространстве и в плане (в проекции на плоскость). Визуальное представление геометрической модели – это либо набор каркасных линий, либо совокупность геометрических фигур, соединяющих точки моделируемой поверхности в определенной последовательности.

Под **конструктивным моделированием** понимается формирование модели конструктивной составляющей корпуса судна (структуры), определяющей декомпозицию структуры на отдельные составляющие, что однозначно задает пространственное и взаимное расположение конструктивных элементов и их функциональное назначение. Визуальное представление результатов конструктивного моделирования – конструктивная схема (конструктивная модель). Формализованное представление результатов – иерархическое кодирование (кодовая модель) и таблицы базы данных по конструкции структурной составляющей корпуса / района корпуса, в которых каждому элементу присвоен уникальный код и определен список параметров, необходимый и достаточный для выполнения проекторочных расчетов [10].

Модели представления геометрии корпуса судна в системе САПР-К

Разрабатываемое специализированное программное обеспечение необходимо для решения задач автоматизированного параметрического проектирования конструкций, в котором подготовка исходной информации для процедур проектирования реализуется с использованием упрощенных методов и алгоритмов.

Для описания геометрии корпуса судна разработана специальная программа - редактор, которая позволяет создать каркасную модель корпуса в трехмерной системе координат (рис. 1). Для того, чтобы построить каркасную модель, применяется несколько методов, выбор которых производится в зависимости от того, какая степень подробности исходной информации о форме корпуса присутствует. К примеру, в случае полного отсутствия информации о форме корпуса, производится генерация каркасной модели, соответствующей заданным параметрам (водоизмещение, положение центра величины, углы наклона ветвей шпангоутов и касательных к ватерлиниям), в случае наличия чертежей общего расположения производится построение модели на основе формы палуб, переборок и диаметрального батокса. Если на момент разработки конструкций имеется теоретический чертеж или 3D-модель корпуса, то производится ввод или импорт точек каркасной модели в базу данных проекта.

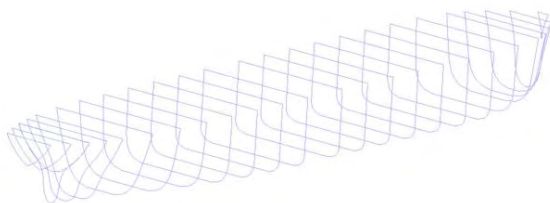


Рис. 1. Геометрическая модель формы корпуса судна

Геометрическое моделирование поперечных гофрированных переборок

Для судов, предназначенных для перевозки навалочных грузов, характерно наличие скуловых и подпалубных цистерн с наклонной крышей и днищем соответственно. Наклон крыши скуловой цистерны обеспечивает самопроизвольное сползание груза в просвет грузового люка под грейфер при разгрузке судна. Наклон днища подпалубной цистерны исключает наличие свободного пространства в подпалубных карманах и, в связи с этим, смещение насыпного/ навалочного груза при качке. Бортовые конструкции могут быть одинарными (рис. 2) или двойными (рис. 3). Это обуславливает специфическую форму геометрии грузовых трюмов судов для перевозки навалочных грузов. В связи с этим, для решения задачи геометрического моделирования гофрированных переборок разработано специализированное программное обеспечение – редактор геометрии гофрированных конструкций, который учитывает все геометрические особенности конструкций гофрированных переборок, отмеченные далее.

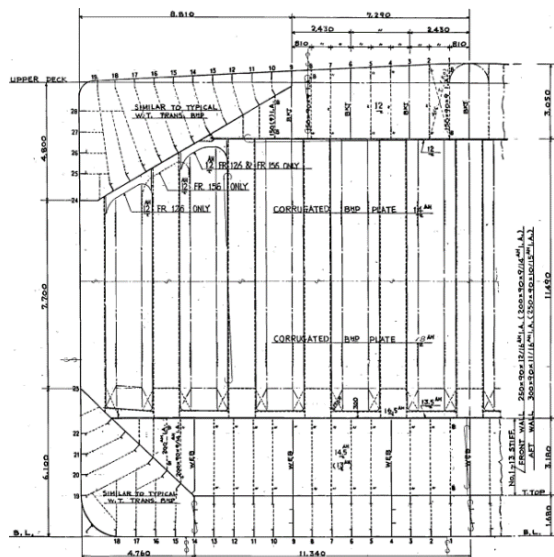


Рис. 2. Поперечная гофрированная переборка судна для перевозки навалочных грузов с одинарным бортом дедвейтом ок. 70 тыс. тонн

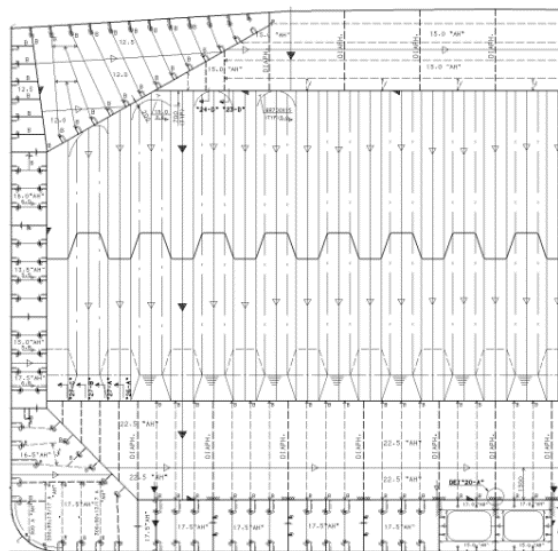


Рис. 3. Поперечная гофрированная переборка судна ANANGEL для перевозки навалочных грузов с двойными бортами

Для районов грузовых трюмов судов, перевозящих навалочный груз, основным конструктивным вариантом поперечных гофрированных переборок являются конструкции с вертикально ориентированными гофрами без шельфов.

Полотнище переборки может изготавливаться из коробчатых или волнистых гофрированных листовых элементов. Наиболее распространенными являются коробчатые гофры, как более простые в изготовлении (рис. 4).

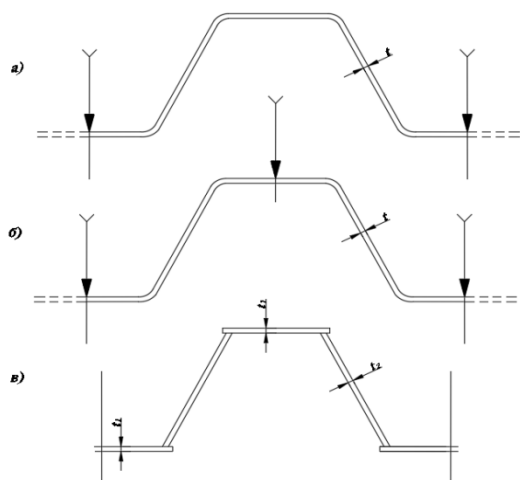


Рис. 4. Поперечное сечение коробчатого гофра
а) штампованный коробчатый гофр; б) штампованный Z – профиль; в) сварной составной профиль

В соответствии с требованиями Правил МАКО, поперечные переборки балкеров с вертикально ориентированными гофрами должны иметь у бортов плоские участки шириной не менее 8% от ширины судна. Такое требование при конструкции двойного борта обеспечивается наличием вертикальной диафрагмы в плоскости переборки. В случае одинарного борта предусматривается введение плоского участка с соответствующими подкреплениями. Пример такого конструктивного решения показан на рис. 5.

В соответствии с требованиями Правил МАКО, гофрированные поперечные переборки судов для перевозки навалочных грузов длиной более 150 м должны устанавливаться на **нижний стул** (трапецеидальную опору) и, как правило, на **верхний стул** у палубы. У навалочных судов, имеющих длину менее 150 м гофрированные поперечные переборки могут устанавливаться непосредственно на настил второго дна и настил верхней палубы.

Если гофрированное полотнище устанавливается прямо на второе дно, то в плоскости горизонтальных граней гофров должны располагаться флоры.

Как правило, плоский участок гофрированной переборки с вертикальными гофрами, примыкающий к смежной конструкции, должен иметь ширину не менее ширины горизонтальной грани гофра.

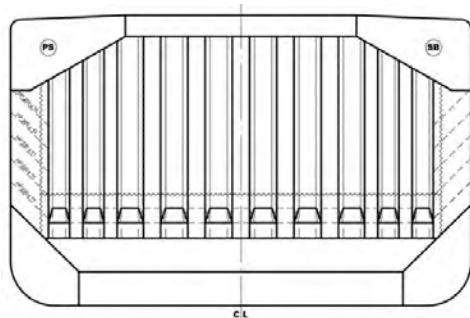


Рис. 5. Поперечная гофрированная переборка с вертикально ориентированными гофрами и плоскими участками у борта судна для перевозки навалочных грузов

Стулья переборки (общие требования). Внутри нижнего стула *поперечной переборки* в плоскости продольных балок междудонного набора (днищевых стрингеров) должны быть предусмотрены диафрагмы или рамные балки (рис. 6).

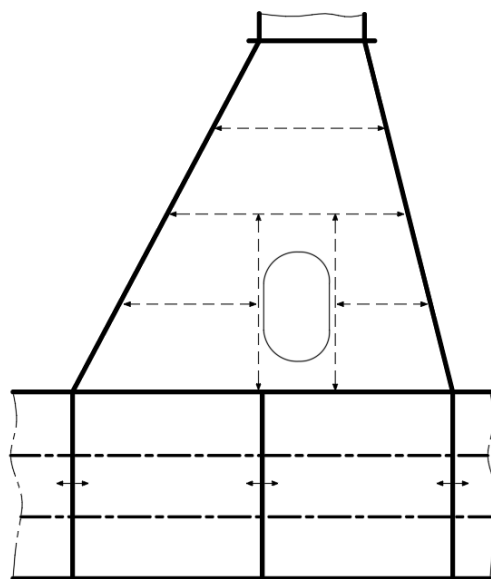


Рис. 6. Диафрагма нижнего стула

Если не предусмотрено нижнего стула, то в плоскости горизонтальных граней гофра должны быть установлены флоры или поперечные рамы.

Для соединения верхнего стула с поперечными рамными балками палубы или концевыми лючковыми бимсами должны быть установлены brackets или высокие рамы (рис. 7).

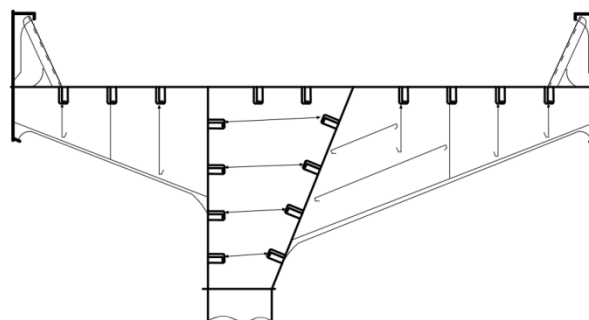


Рис. 7. Крепление верхнего стула

Если не предусматривается наличие верхнего стула, то в плоскости горизонтальных граней гофра должны быть установлены поперечные рамные балки.

Нижний стул. Нижний стул, если он устанавливается, должен иметь высоту не менее, чем в 3 раза превосходящую высоту гофра. Нетто толщина и предел текучести материала *опорного листа* стула должны быть не менее чем у примыкающего листа полотнища переборки. Нетто толщина и прочность материала верхней части *наклонной грани* стула на ширине, эквивалентной ширине горизонтальной грани гофра, должны быть

не менее чем у наклонной грани полотнища переборки в нижней ее части.

Ширина нижнего стула на уровне второго дна должна быть не менее 2.5 высот гофра.

Должна быть обеспечена адекватная непрерывность гофрированной переборки и наклонных граней нижнего стула. В частности, верхний пояс наклонной грани нижнего стула должен иметь такую же толщину и должен быть изготовлен из того же материала, что и нижний пояс переборки.

Верхний стул. Верхний стул, если он предусматривается, должен иметь высоту не менее, чем в 2 - 3 раза превосходящую высоту гофра. Прямоугольный стул (с вертикальными стенками) должен иметь высоту не менее, чем в 2 раза превосходящую высоту гофра.

Ширина **опорного листа верхнего стула** должна быть, как правило, такой же, как у нижнего стула. Ширина стула на уровне палубы должна как минимум вдвое превосходить высоту гофра.

Нетто толщина и предел текучести материала опорного листа стула должны быть такими же, как у примыкающего листа полотнища переборки. Нетто толщина и прочность материала нижней части наклонной грани стула должны быть не менее 80% от соответствующих требуемых характеристик полотнища переборки в верхней ее части при таком же материале.

Шеддерный лист (Shedder plate – сбрасывающая <навалочный груз> пластина).

Шеддерные листы (рис.8) являются эффективными, если они:

- не изогнуты;
- установлены с уклоном не менее 45 град. и их нижняя кромка расположена по одной линии с наклонной стенкой нижнего стула;
- имеют толщину не менее 75% толщины, требуемой для горизонтальной грани гофрированного полотнища;
- изготовлены из материала, характеристики которого не ниже, чем требуются для горизонтальной грани гофрированного полотнища.

Гассетный лист (Gusset plate – накладная пластина, увеличивающая площадь поперечного сечения в опоре гофра).

Гассетные листы (рис. 9,10) являются эффективными, если они:

- в комбинации с шеддерными листами имеют толщину, характеристики материала и сварные соединения, как это требуется для шеддерных листов;
- имеют высоту не менее половины ширины горизонтальной грани гофрированного полотнища;
- расположены в одной линии с наклонной стенкой нижнего стула;
- имеют толщину не менее толщины, требуемой для горизонтальной грани гофрированного полотнища.

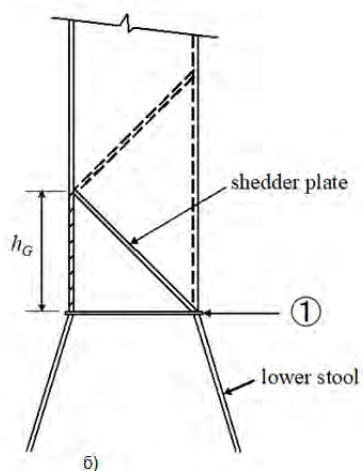
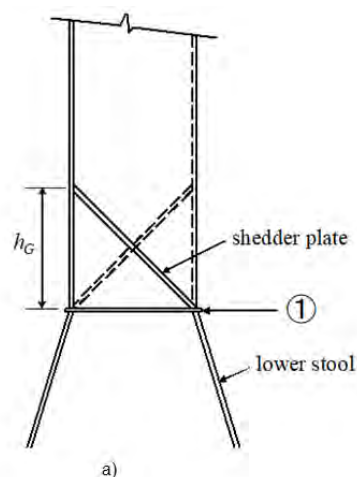


Рис. 8. Шеддерные листы
а) симметричный шеддерный лист;
б) несимметричный шеддерный лист

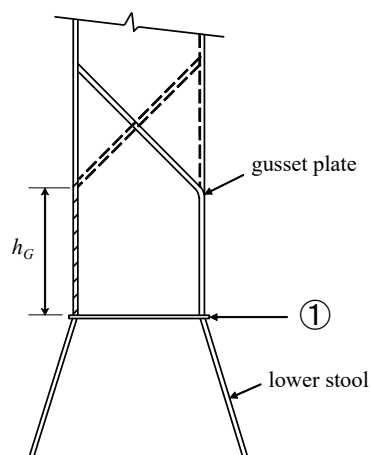


Рис. 9. Симметричный гассетный/шеддерный листы

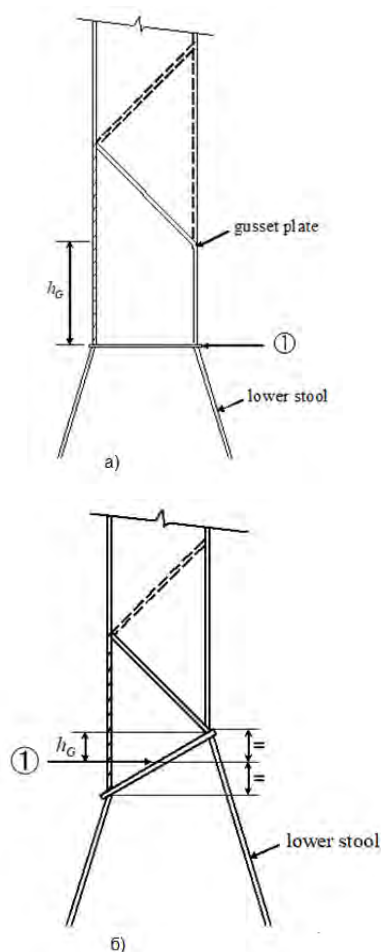


Рис. 10. Несимметричные листы
а) гассетный лист; б) шеддерный лист

Шеддерные и гассетные листы предназначены для увеличения момента сопротивления гофрированного элемента в опорном сечении.

Конструктивное моделирование поперечных гофрированных переборок

Для решения задачи конструктивного моделирования, в первую очередь, необходимо принять систему автоматизированной идентификации конструктивных элементов, для чего применяется структурная декомпозиция и иерархическое кодирование.

Декомпозиция корпуса на отдельные составляющие описана в работе [11].

В программном комплексе САПР-К используется структурная декомпозиция корпуса судна, предложенная для разработки систем автоматизированного параметрического проектирования конструкций корпуса судна [8]. Структурной декомпозиции корпуса судна ставится в соответствие определенная система кодирования, используемая при разработке программного кода. Предложен следующий общий иерархический каталог структурных групп верхнего уровня:

- 01 ДНИЩЕ
- 02 БОРТ
- 03 СТЕНКИ НАДСТРОЙКИ
- 04 ПАЛУБЫ

- 05 ПЛАТФОРМЫ
- 06 ПРОДОЛЬНЫЕ ПЕРЕБОРКИ (ПЛОСКИЕ)
- 07 ПРОДОЛЬНЫЕ ПЕРЕБОРКИ (ГОФРИРОВАННЫЕ)
- 08 ПОПЕРЕЧНЫЕ ПЕРЕБОРКИ (ПЛОСКИЕ)
- 09 ПОПЕРЕЧНЫЕ ПЕРЕБОРКИ (ГОФРИРОВАННЫЕ)
- 10 СКУЛОВЫЕ ЦИСТЕРНЫ
- 11 ПОДПАЛУБНЫЕ ЦИСТЕРНЫ
- 12 КОМИНГСЫ ПРОДОЛЬНЫЕ (НЕРАЗРЕЗНЫЕ)
- 13 КОМИНГСЫ ПРОДОЛЬНЫЕ (РАЗРЕЗНЫЕ)
- 14 КОМИНГСЫ ПОПЕРЕЧНЫЕ

Структура каталога соответствует объективно существующей конструкции корпуса судна. Каталог верхнего уровня может дополняться новыми группами структурных составляющих. При разработке системы кодирования структурных составляющих корпуса и их элементов принятая структура каталога должна быть жестко зафиксирована.

Каталоги более низких уровней формируются с учетом основополагающего принципа - структура каталога должна быть максимально унифицированной для различных групп конструкций, даже если это приводит к избыточности кода (т.е. многие уровни кода могут никогда не использоваться).

Предложенная система кодирования обеспечивает высокий уровень унификации. Количество структурных составляющих (подгрупп) практически не ограничено, к примеру, в базу данных проекта может быть внесено до 99 палуб, поперечных переборок и т.д.

Декомпозиция корпуса судна и кодирование элементов его конструкции реализуется в два этапа:

- на этапе геометрического моделирования – при декомпозиции корпуса на отдельные укрупненные структурные составляющие и формировании геометрической модели корпуса в целом или в пределах выделенного района;

- на этапе конструктивного моделирования - в процессе которого выполняется подразделение (раскрой) листовых конструкций на отдельные листы / группы листов, трассировка балок и объединение их в группы, задание параметров, позволяющих определить положение листов и балок набора в составе корпуса судна, и других данных, необходимых для организации процедур параметрического проектирования.

Кодирование элементов корпуса судна значительно упрощает и систематизирует процесс разработки программного кода системы автоматизированного проектирования.

Как было указано ранее, гофрированные переборки имеют специфическую структуру. Далее показан фрагмент каталогов кодировки, в котором рассматриваются только те составляющие, которые встречаются в типовых конструкциях гофрированных переборок навалочных судов.

Декомпозиция поперечной переборки гофрированной:

- 09 Поперечные переборки гофрированные
- 0901 Поперечная переборка гофрированная <01>
- 090101 Гофрированное полотнище <01>

090105 Вертикальная рама <01>
090106 Горизонтальная рама <01>

090110 Обшивка опоры нижней (носовая) <01>
090111 Обшивка опоры нижней (кормовая) <01>
090112 Опорный лист опоры нижней <01>

090120 Обшивка опоры верхней (носовая) <01>
090121 Обшивка опоры верхней (кормовая) <01>
090122 Опорный лист опоры верхней <01>

Декомпозиция листов гофрированного полотнища:

09 Поперечные переборки гофрированные
0901 Поперечная переборка гофрированная <01>

090101 Гофрированное полотнище
09010101 Полотнище <участок 01>

...
090101XX Полотнище <участок XX>
090101XX01 Листы полотнища
090101XX0101 Лист пол. **нижний**
090101XX010101 Лист пол. **нижний** № 01

...
090101XX0102 Лист пол.
090101XX010101 Лист пол. № 01

...
090101XX0103 Лист пол. **верхний**
090101XX010301 Лист обшивки **верхний** № 01

...
090101XX0104 Лист гассетный
090101XX010401 Лист гассетный № 01

...
090101XX0105 Лист шеддерный
090101XX010501 Лист шеддерный № 01

...
Декомпозиция и кодирование балок набора гофрированного полотнища:

09 Поперечные переборки гофрированные
0901 Поперечная переборка гофрированная <01>
090101 Обшивка <01>

09010101 Обшивка <01><участок 01>

...
090101XX Обшивка <01> <участок XX>
090101XX02 Р. ж. на плоском участке
090101XX0201 Р. ж. на плоском участке типа 01
090101XX020101 Р. ж. на плоском участке типа 01 № 01

...
090101XX05 Вертикальная рама
090101XX0501 Вертикальная рама типа 01
090101XX050101 Вертикальная рама типа 01_№ 01
090101XX06 Горизонтальная рама
090101XX0601 Горизонтальная рама типа 01
090101XX060101 Горизонтальная рама типа 01_№ 01

...
Декомпозиция и кодирование трапецеидальных опор (применительно к конструкции на рис. 11):

090110 Обшивка опоры нижней (носовая) <01>
090110XX Обшивка опоры нижней (носовая) <участок XX>

090110XX01 Обшивка носовой стенки
090112XX01 Обшивка кормовой стенки
090113XX01 Вертикальные диафрагмы

...
090110 Обшивка опоры нижней (носовой) <01>

...
090110XX Обшивка носовой стенки
опоры нижней <участок XX>
090110XX0101 Лист обшивки нижний
090110XX010101 Лист обшивки нижний № 01

...
090110XX03 Вертикальные балки
основного набора
090110XX0301 Вертикальные балки
основного набора типа 01
090110XX030101 Вертикальные балки
основного набора типа 01_№ 01

...
090113XX01 Вертикальная диафрагма
или

090110XX05 Вертикальная рама

...
Декомпозиция и кодирование, реализованное для нижней трапецеидальной опоры, распространяется и на верхнюю опору – коды верхнего уровня 090120 (Обшивка опоры верхней (носовая) и 090121 (Обшивка опоры верхней (кормовая) и 090123 (Вертикальные диафрагмы опоры верхней).

Результатом конструктивного моделирования гофрированной переборки является набор кодовых конструктивных моделей (*применительно к конструкции на рис. 11*):

Полотнище поперечной	090101XX0101
гофрированной	090101XX0102
переборки –	090101XX0103
	090101XX0104
	090101XX0105

Нижняя опора -	090110XX0101
	090111XX0101
	090113XX0101
	090110XX0301
	090111XX0301
Опорный лист нижней	090112XX0101
опоры -	090112XX0301

Верхняя опора -	090120XX0101
	090121XX0101
	090123XX0101
	090120XX0201
	090121XX0201
	090120XX0601
	090121XX0601

Опорный лист верхней	090122XX0101
опоры -	090122XX0301

На рис. 11 показано визуальное представление кодовой конструктивной модели.

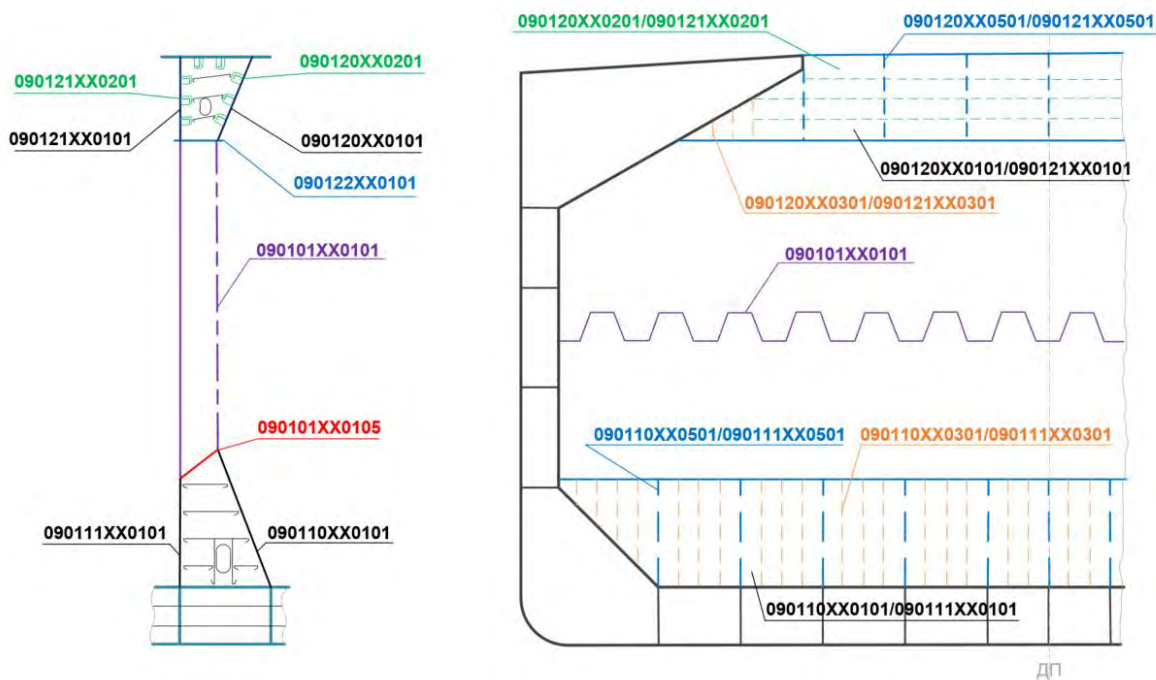


Рис. 11. Визуальное представление кодовой конструктивной модели

Алгоритмы геометрического и конструктивного моделирования поперечной гофрированной переборки

Программное обеспечение САПР-К, применяется для проектирования конструкций поперечных гофрированных переборок с вертикальной ориентацией гофров судов для перевозки навалочных грузов.

Специализированное программное обеспечение обеспечивает возможность описания гофрированных переборок с коробчатыми гофрами, опирающимися на стулья или на настил второго дна и верхнюю палубу.

Структура интерфейса программного модуля геометрического и конструктивного моделирования гофрированных переборок состоит из следующих пунктов:

- «Общие данные»;
- «Верхняя опора»;
- «Нижняя опора»;
- «Балки опор»;
- «Листы опор»;
- «Гофрированное полотнище»;
- «Расчет».

Предлагается следующий алгоритм геометрического и конструктивного моделирования поперечной гофрированной переборки и формирования базы данных для решения задач проверки прочности / проектирования конструкций переборки в автоматизированной системе САПР-К (реализации предложенного алгоритма демонстрируется применительно к судну для перевозки навалочного груза дедеветом 170 тыс. т.):

1. Во вкладке «Общие данные» задаются положение переборки по длине судна, то есть номер шпангоута и смещение, а также рамная шпация.

Проводится формирование иерархического справочника по конструктивной декомпозиции переборки. Для автоматизации этого процесса предусмотрен интерфейс для выбора типа кодовой модели из предлагаемого списка типов (кодировку см. выше). Здесь же осуществляется выбор типа поперечной переборки согласно коду: с вертикальной/горизонтальной ориентацией гофров, переборка с плоскими участками/без плоских участков;

2. Задание контура поперечного сечения корпуса судна, расположения внутренних конструкций, ограничивающих полезный объем грузового трюма (второе дно, крыша скуловой цистерны, второй борт (при наличии), дно подпалубной цистерны) (рис. 12);

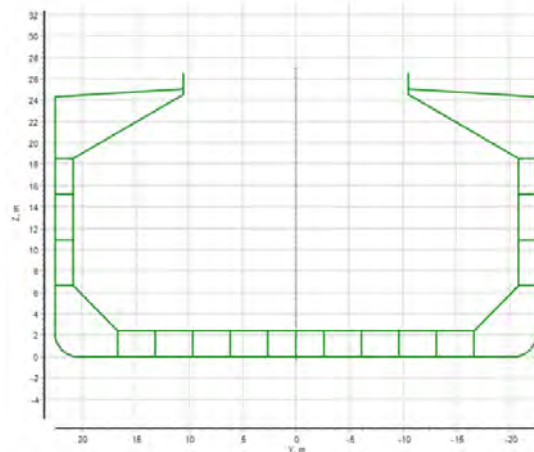


Рис. 12. Контур поперечного сечения с положением внутренних конструкций

3. В соответствии с принятой кодовой моделью конструкции выполняется определение контура поперечной переборки (рис. 13);

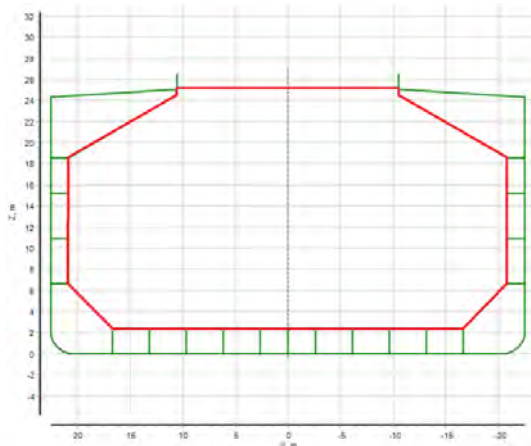


Рис. 13. Контур поперечной гофрированной переборки

4. Выбор параметров и размещение внутри трюма геометрических моделей трапециевидальных опор (рис. 14); Во вкладках «Верхняя опора» и «Нижняя опора» задаются параметры, описывающие конструкцию опор (стульев) поперечной переборки.

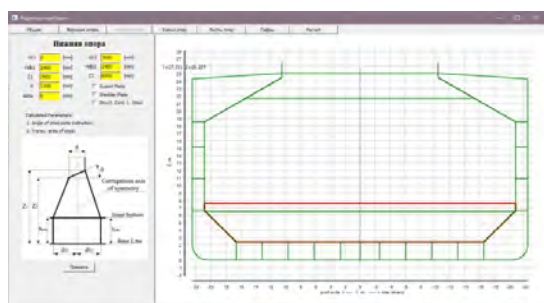


Рис. 14 Выбор параметров опор переборки

5. Выбор параметров гофрированного полотна и его размещение на стульях. Согласование положения осевых линий гофров и вертикального рамного набора стульев (рис. 15). В случае отсутствия информации о параметрах гофра в автоматизированной системе САПР-К предусмотрено задание таких параметров на основании статистической информации;

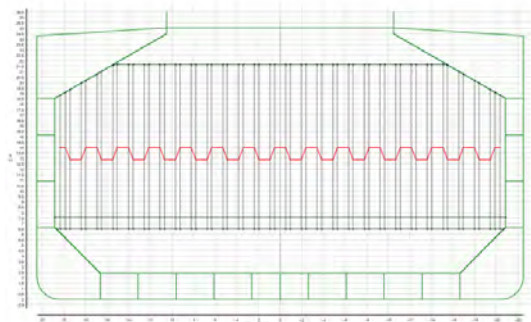


Рис. 15. Визуализация геометрии гофрированного полотна

6. Раскрой гофрированного полотна на листы в соответствии с принятой технологией изготовления гофров (штамповка коробчатого профиля, штамповка Z – профиля, сварной составной профиль) (см. рис. 4);

7. Компоновка конструкции плоского участка (при наличии);

8. Во вкладке «Балки опор» и «Листы опор» задаются:

- положение и параметры балок основного набора, расположенного на стенках стульев;
- раскрой листовых конструкций верхней и нижней опор на листы.

9. Во вкладке «Гофрированное полотно» производится деление полотна на гофрированные элементы в зависимости от способа их изготовления, задаются такие параметры, как марка материала, построечная толщина, тип отсеков, расположенных в нос и корму от рассматриваемой переборки.

Результат формирования модели поперечной гофрированной переборки навалочного судна представлен на рис. 16.

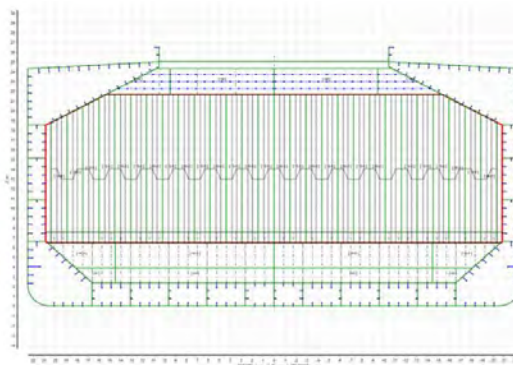


Рис. 16. Визуализация окончательной модели гофрированной переборки

После формирования геометрической и конструктивной модели переборки информация передается в модули поиска оптимальных толщин и сечений элементов. По окончании работ производится финальная проверка конструкции переборки на соответствие требованиям нормативных документов.

В дальнейшем, информация, записанная в базу данных проекта, может быть использована для экспорта модели переборки в программы расчета нагрузки масс, системы автоматизированного проектирования и анализа МКЭ (Autocad, Ascon, AVEVA, ANSYS и др.).

Заключение

В настоящей статье рассмотрены методические основы, принятые при разработке программного обеспечения, предназначенного для решения задач геометрического и конструктивного моделирования поперечных гофрированных переборок судов для перевозки навалочных грузов, включенного в состав системы САПР-К, и необходимого для реализации решения задач проверочного и проектировочного расчета.

Литература

1. IACS Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers. IACS, 2022, 810 с.
2. Российский морской Регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. СПб, 2023, 336 с.
3. Васильев А.Л., Глозман М.К., Павлинова Е.А., Филиппео М.В. Прочные судовые гофрированные переборки. Л., изд. «Судостроение», 1964, 313 с.
4. Sang-Hoon Shin, Dae-Eun Ko A study on minimum weight design of vertical corrugated bulkheads for chemical tankers. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, No. 10, 2018, 180 – 187 pp.
5. Dae-Eun Ko, Sang-Hoon Shin A study on the optimum design of corrugated bulkhead for product carrier. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, No. 269, 2017.
6. Jerolim Andric, Vedran Zanic, Mate Grgic Structural optimization of corrugated transverse bulkheads made of stainless steel. Brodogranja, Vol. 61, No. 1, 2010, 18-27 pp.
7. Joe-Ming Yang, Cheng-Neng Hwang Optimization of corrugated bulkhead forms by genetic algorithm. Journal of marine science and technology, Vol. 10, No. 2, 2002, 146-153 pp.
8. Алексашин Д.А., Плотноков К.В., Тряскин В.Н. Параметрическое проектирование поперечных гофрированных переборок навалочных судов с учетом требований Общих Правил МАКО. – Морские интеллектуальные технологии, Санкт-Петербург, 2015, выпуск 4 (30), том 2, с. 19-24.
9. Sergey Ryumin, Vladimir Tryaskin Computer-Aided System for Parametric Design of Ship Hull Structures – CADSHull. Machines, Vol. 10, No. 262, 2022.
10. Тряскин В.Н. Автоматизированное параметрическое проектирование конструкций корпуса судна: учебное пособие/ В.Н. Тряскин. – СПб.: СПбГМТУ, 2010, 152 с.
11. Тряскин В.Н. Методология автоматизированного проектирования конструкций корпуса судна: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.08.03. – Санкт-Петербург, 2007, 339 с.

References

1. IACS Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers. IACS, 2022, 810 с.
2. Rossijskij morskoy Registr sudohodstva. Pravila klassifikacii i postrojki morskix sudov. Chast' II. Korpus. [Rules for the classification and construction of sea-going ships. Part II. Hull] SPb, 2023, 336 s.
3. Vasil'ev A.L., Glozman M.K., Pavlinova E.A., Filippio M.V. Prochnye sudovye gofirovannye pereborki. [Durable corrugated ship bulkheads] L., izd. «Sudostroenie», 1964, 313 s.
4. Sang-Hoon Shin, Dae-Eun Ko A study on minimum weight design of vertical corrugated bulkheads for chemical tankers. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, No. 10, 2018, 180 – 187 pp.
5. Dae-Eun Ko, Sang-Hoon Shin A study on the optimum design of corrugated bulkhead for product carrier. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, No. 269, 2017.
6. Jerolim Andric, Vedran Zanic, Mate Grgic Structural optimization of corrugated transverse bulkheads made of stainless steel. Brodogranja, Vol. 61, No. 1, 2010, 18-27 pp.
7. Joe-Ming Yang, Cheng-Neng Hwang Optimization of corrugated bulkhead forms by genetic algorithm. Journal of marine science and technology, Vol. 10, No. 2, 2002, 146-153 pp.
8. Aleksashin D.A., Plotnikov K.V., Tryaskin V.N. Parametricheskoe proektirovanie poperechnykh gofirovannykh pereborok navalochnykh sudov s uchetom trebovanij Obshchih Pravil MAKO. [Parametrical design of bulk carrier corrugated bulkheads according to the requirements of IACS Common Structural Rules] – Morskie intellektual'nye tekhnologii, Sankt-Peterburg, 2015, vypusk 4 (30), tom 2, s. 19-24.
9. Sergey Ryumin, Vladimir Tryaskin Computer-Aided System for Parametric Design of Ship Hull Structures – CADSHull. Machines, Vol. 10, No. 262, 2022.
10. Tryaskin V.N. Avtomatizirovannoe parametricheskoe proektirovanie konstrukcij korpusa sudna [Automated parametric design of ship hull structures]: uchebnoe posobie/ V.N. Tryaskin. – SPb.: SPbGMTU, 2010, 152 s.
11. Tryaskin V.N. Metodologiya avtomatizirovannogo proektirovaniya konstrukcij korpusa sudna [Methodology of computer-aided design of ship hull structures]: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskix nauk: 05.08.03. – Sankt-Peterburg, 2007, 339 s.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Тряскин Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru

Vladimir N. Tryaskin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of ship construction and technical operation, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru

Дехтярь Ирина Владимировна, старший преподаватель кафедры конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: Dekhtyar@smtu.ru

Irina V. Dekhtyar, the senior lecturer of the Department of ship construction and technical operation, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: Dekhtyar@smtu.ru

Рюмин Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: rumin@smtu.ru

Sergey N. Ryumin, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of ship design, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: rumin@smtu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.01.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.01.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 28.01.2024.

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.003>

Светлой памяти С. В. Антоненко

Сопротивление воды движению маломерных судов с упрощёнными обводами

Аносов А.П.¹ anosov49@mail.ru, [Антоненко С.В.](#), Бессонова В.О.¹ bessonova.vo@dvfu.ru,
Воробьева А.А.¹ vorobeve.aand@dvfu.ru

¹Дальневосточный федеральный университет

Аннотация. Для получения достоверных данных о сопротивлении воды движению судна были проведены натурные буксировочные испытания малых промысловых судов с упрощёнными обводами. На основе полученных данных была разработана формула для определения буксировочного сопротивления таких судов. В ходе исследования проведена оценка возможности использования известных математических методов для определения буксировочного сопротивления судов. Были использованы методики В. А. Ерошина, Дж. Холтропа, а также другие методы. Проведены расчеты сопротивления с использованием программного продукта SolidWorks в приложении Flow Simulation. Исследования позволили оценить эффективность применения различных методик и провести сравнительный анализ с натурными испытаниями. Выполнены модельные буксировочные испытания в опытовом бассейне. Сопоставлены результаты, полученные расчетным путем и при модельных испытаниях в опытовом бассейне, с результатами натурных буксировочных испытаний.

Ключевые слова: сопротивление воды движению судов, определение буксировочного сопротивления, суда с упрощёнными обводами.

Благодарности: авторы выражают благодарность Антоненко Сергею Владимировичу за его опыт и помощь в исследовании и написании работы.

Для цитирования: Аносов А.П., [Антоненко С.В.](#), Бессонова В.О., Воробьева А.А. Сопротивление воды движению маломерных судов с упрощёнными обводами. 2024. № 1 часть 1, С. 31—40. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.003

Original article.

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.003>

Water resistance to the movement of small vessels with simplified hull lines

Anatolij P. Anosov¹ anosov49@mail.ru, [Sergej V. Antonenko](#), Viktoriya O. Bessonova¹ bessonova.vo@dvfu.ru,
Anna A. Vorobeve¹ vorobeve.aand@dvfu.ru

¹Far East Federal University, Vladivostok

Abstract. To obtain reliable data on the resistance of water to the movement of the vessel, full-scale towing tests of small fishing vessels with simplified contours were carried out. Based on the data obtained, a formula was developed to determine the towing resistance of such vessels. The study assessed the possibility of using well-known mathematical methods to determine the towing resistance of ships. The methods of V. A. Eroshin, J. Holtrop, as well as other methods were used. Resistance calculations were performed using the SolidWorks software product in the Flow Simulation application. The research made it possible to evaluate the effectiveness of various techniques and conduct a comparative analysis with field tests. Model towing tests were performed in the experimental pool. The results obtained by calculation and during model tests in the experimental pool are compared with the results of full-scale towing tests.

Key words: water resistance to ship movement, determination of towing resistance, vessels with simplified hull lines.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to Antonenko Sergey Vladimirovich for his experience and assistance in researching and writing the work.

Financial Support:

For citation: Anosov A.P., [Antonenko S.V.](#), Bessonova V.O., Vorobeve A.A. Water resistance to the movement of small vessels with simplified contours. 2024. № 1 part 1, P. 31—40. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.003

Введение

Значительная доля в объемах вылова рыбы в морях Дальнего Востока приходится на прибрежный лов в периоды хода рыбы на нерест. Это, кроме прочего, связано с тем, что на внутреннем и международном рынках большим спросом пользуется икра. Промысел начинается в мае-июне с лова сельди, и далее до октября периодически

наблюдается ход различных видов красной рыбы – горбуши, нерки, кеты, кижуча. Рыбу ловят вблизи от устьев нерестовых рек и в самих реках. Специфика прибрежного лова состоит в том, что переработка рыбы осуществляется на береговых предприятиях, а выделяемые по квотам морские промысловые участки зачастую находятся на расстоянии несколько десятков километров от них.

Для транспортировки рыбы от мест лова на перерабатывающие предприятия используются специальные боты, на которых рыба перевозится в открытых сверху и сообщающихся с заборным пространством отсеках (рис. 1). Это обеспечивает сохранение качества рыбы-сырца на должном уровне в процессе достаточно длительной транспортировки.

а)



б)



Рис. 1. Бот для транспортировки рыбы (проект 888): а – погрузка рыбы из невода; б – бот на ходу

По проектам и при авторском сопровождении конструкторского бюро «ВладСудоПроект» (г. Владивосток) было построено несколько ботов трех модификаций. Они имеют близкие по форме и размерам корпуса – формы носовых частей корпусов одинаковы при некоторых конструктивных отличиях их кормовых оконечностей. На первом из ботов (проект 888, рис. 1) был использован подвесной бензиновый мотор фирмы SUZUKI мощностью 250 л.с., а боты последующих модификаций приводятся в движение стационарными дизельными двигателями приблизительно той же или меньшей мощности.

При значительной удаленности промысловых участков от перерабатывающих предприятий на первый план выступает проблема обеспечения оптимальной скорости ботов: с одной стороны, исходя из соображений сохранности рыбы и оборачиваемости судов в течение светового дня, необходима достаточно высокая скорость, а с другой – движение должно быть в экономичном режиме, т.е. при минимизации расхода топлива.

Для разработки формы подводной части корпусов в качестве прототипа была взята форма корпуса лодок, широко применяющихся рыбаками прибрежных районов Охотского моря (рис. 2). Эти лодки обладают хорошей мореходностью и маневренностью. В то же время их отличает упрощенная форма обводов корпуса, что существенно снижает трудоемкость постройки.

а)



б)



Рис. 2. Моторная лодка для транспортировки рыбы: а – лодка на ходу; б – корпус лодки

При оптимальной с точки зрения практического опыта грузоемкости проектируемых ботов их линейные размеры оказались приблизительно в полтора раза больше размеров лодки-прототипа. Длина между перпендикулярами составляет 15-17 метров против 10-11 метров.

При выборе двигателя и расчете винта для ботов возникли сложности, связанные с определением сопротивления воды движению судна. Ни одна из существующих методик расчета не обеспечила необходимой точности. В связи с этим для первых ботов мощности двигателей оказались с избыточным запасом, а винты пришлось переделывать после уточнения их характеристик по результатам ходовых испытаний.

Таким образом, целью работы является разработка методики расчета сопротивления корпусов маломерных рыболовных судов с упрощенными обводами. Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

- выполнены расчеты сопротивления с помощью известных методов для оценки их применимости;
- созданы математические модели рассматриваемых судов и выполнены расчеты сопротивления с помощью программного продукта SolidWorks-Flow Simulation;
- распечатаны физические модели корпусов на 3d-принтере и выполнено исследование их сопротивления в опытовом бассейне;
- проведены натурные буксировочные испытания судов проектов 888 и 333;
- по результатам натурных буксировочных испытаний получена формула вида формулы адмиралтейских коэффициентов для определения сопротивления корпусов судов рассмотренного типа и близких размеров.

1. Основные характеристики исследуемых судов

Хронологически первым был разработан и построен бот проекта 888. Далее следовали боты проектов 555 и 333. В этой же последовательности происходила отработка формы их корпусов с учетом опыта эксплуатации предыдущей модификации.

1.1. Первый проект

При разработке бота проекта 888 было учтено, что форма корпуса лодки-прототипа при достижении определенной скорости обеспечивает переходный к глиссированию режим движения. При этом из-за недостаточной полноты подводной части кормы наблюдается ее значительная – практически до палубы – просадка и, как следствие, значительный дифферент на корму (рис.2, а). Следует отметить, что этот эффект наблюдается только при открытых кингстонах, когда грузовые отсеки заполнены либо водой, либо рыбой. При осушенных грузовых отсеках лодка-прототип сидит на ровный киль (рис. 3). Такой вариант эксплуатации проектируемых ботов тоже предусматривался. В перерывы между периодами массового хода рыбы на нерест боты с осушенными грузовыми отсеками можно использовать для выполнения рейдовых грузовых операций.



Рис. 3. Лодка-прототип на ходу при осушенных грузовых отсеках

Для устранения ходового дифферента в грузу у бота 888 была изменена форма кормы – бортовые перекрытия были продлены до кормы на полную высоту борта и от них в сторону диаметральной плоскости сформированы днищевые були с сохранением между ними кормового подзора, где в диаметральной плоскости размещался подвесной мотор (рис. 4).

а)



б)



Рис. 4. Бот проекта 888: а – теоретический чертеж; б – общий вид корпуса

В первый год эксплуатации бота проекта 888 выявились некоторые его недостатки.

При осушенных грузовых отсеках судно сидело на ровный киль, а при затопленных – имело большой

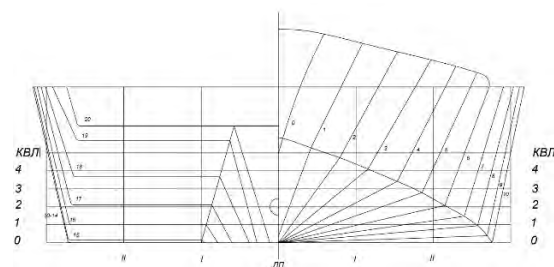
дифферент на нос. В результате пришлось уложить в корме значительное количество твердого балласта.

Неудачным оказался выбор двигателя, более пригодного для скоростных глиссирующих судов, что характерно для большинства подвесных моторов. При максимальной скорости 8 узлов имеет место большой расход топлива. Кроме того, при перекладке мотора на борт при поворотах струя от винта направлялась во внутреннюю стенку протяженного в корму бортового буля, что существенно ухудшало управляемость. В результате пришлось скруглить нижние прямые углы булей.

1.2. Второй проект

Хронологически вторыми были два бота проекта 555. В силу ряда субъективных причин проектная документация для них не разрабатывалась. За основу были взяты чертежи проекта 888 и умозрительно, без расчетов заводскими конструкторами была изменена конфигурация кормовой оконечности (рис. 5).

а)



б)



в)

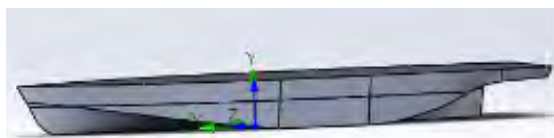
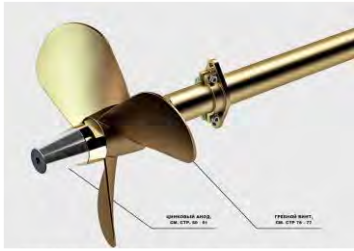


Рис. 5. Бот проекта 555: а – теоретический чертеж; б – кормовой подзор (в процессе постройки); в – 3d-модель корпуса

Таким же образом был выбран двигатель фирмы WEICHAI марки WP6C156-21 и по реестру одной из китайских фирм заказан готовый винт в комплекте с валопроводом (рис. 6). Несмотря на такой «своеобразный» подход к проектированию, бот показал скорость около 6-7 узлов.

а)



б)

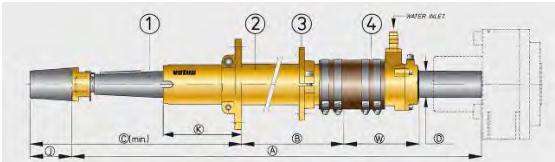


Рис. 6. Винт на валу (а) и валопровод (б)

Очевидным просчетом в этом варианте бота было повторение недостатка, характерного для лодки-прототипа, – большой кормовой подзор. Следствием нехватки водоизмещающего объема кормовой части стала посадка судна со значительным дифферентом на корму. Это усугублялось кормовым расположением машинного отделения и более развитой, чем у бота проекта 888, рубкой (рис. 7). Попытка установки по нижней кромке транца некоего подобия крыла не дала эффекта в силу малой скорости бота.



Рис. 7. Боты проектов 888 (на переднем плане) и 555.

Расположение над машинным отделением ходовой рубки, которая одновременно является жилой, серьезно ухудшило условия обитания – наблюдается интенсивная вибрация, шум и загазованность.

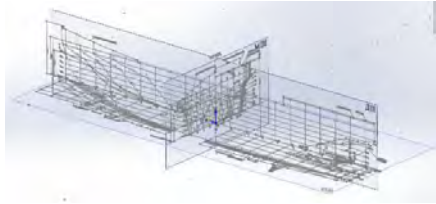
Необходимо отметить, что боты проектов 555 и 888 имеют общий недостаток – их остойчивость, хотя соответствует требованиям правил РМРС, но находится на пределе.

1.3. Третий проект

При проектировании бота 333 были учтены недостатки, выявившиеся при эксплуатации ботов проектов 555 и 888.

При неизменной форме носовой оконечности полнота кормовой части при сохранении днищевых булей обеспечила нормальную удифферентовку в сочетании с хорошей управляемостью и беспрепятственным подтоком воды к винту. Форма корпуса показана на рис. 8, а общий вид бота – на рис. 9.

а)



б)

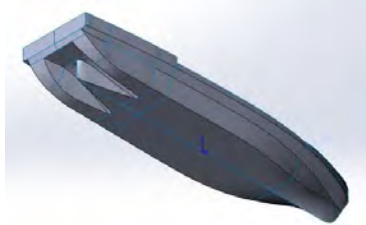


Рис. 8. Бот проекта 333: а – теоретический чертёж; б – 3d-модель корпуса

Перенос рулевой (жилой) рубки в нос от грузовых отсеков кардинально улучшил условия обитания и облегчил удифферентовку бота.

Проблема обеспечения остойчивости была решена установкой бортовых булей на всю высоту надводного борта, а в корме – до палубы квартердека.

Главные размерения трех ботов приведены в табл. 1.



Рис. 9. Бот проекта 333 в цехе

Таблица 1
Главные размерения ботов проектов 555, 333 и 888

Проект бота	555	333	888
Длина м/у пп, м	13,32	16,50	15,00
Ширина по КВЛ, м	4,130	3,894	3,818
Осадка по КВЛ, м	0,80	1,00	0,80
Водоизмещение, м³ / т	30,5 / 31,3	44,6 / 45,7	30,6 / 31,3
Смоч. пов-ть, кв. м	76,67	81,493	63,24
Мощность ГД, кВт / л.с.	110 / 150	168 / 228	184 / 250
Коэффициенты полноты по КВЛ:			
δ	0,694	0,694	0,667
α	0,740	0,830	0,779
β	0,957	0,961	0,960

При выборе двигателя и расчете винта возникла проблема, которая мотивировала выполнение представленного в данной работе исследования, – это проблема определения с достаточной точностью сопротивления воды движению бота.

2. Натурные буксировочные испытания ботов

Буксировочные испытания ботов были проведены в лимане реки Кухтуй (район поселка Охотск) на мерном отрезке, протяженностью 1 км. Для исключения влияния течения реки, приливных течений и ветра измерения проводились при прямом и обратном прохождении дистанции. Исследуемые боты буксировались катером типа КЖ. Для максимального исключения влияния на результаты измерения струи от винта буксира длина буксирного троса составляла 70 м. Усилие натяжения троса (буксировочное сопротивление бота) фиксировалось цифровым динамометром, а скорость буксировки – с помощью GPS-навигатора.

На время испытаний с бота проекта 888 подвесной двигатель был снят. Бот проекта 333, снабженный стационарным двигателем, буксировался с винтом при отсутствии авторотации. В силу ограниченной мощности буксирного катера максимальная достигнутая при испытаниях скорость каравана составила около 7 узлов. При всех вариантах загрузки боты сидели «на ровный киль». Бот проекта 555 по ряду причин не испытывался.

Графическая интерпретация результатов испытаний для наиболее распространенного случая полной загрузки (по КВЛ) ботов проектов 333 и 888 приведена на рис. 10.

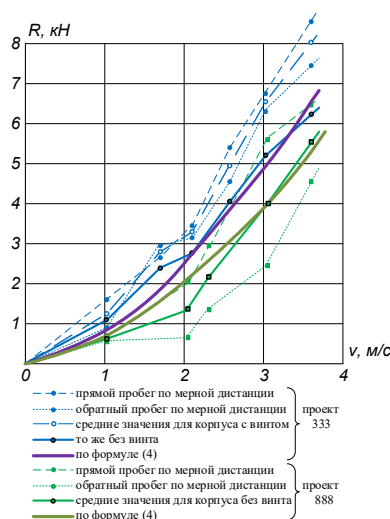


Рис. 10 Результаты натурных буксировочных испытаний ботов проектов 333 и 888 для случая полной загрузки

Для каждого из двух ботов приведены зависимости буксировочного сопротивления от скорости при прямом и обратном пробегах по мерной дистанции и средние значения сопротивлений. Кроме того, для бота проекта 333 приведена указанная зависимость за вычетом составляющей сопротивления от нератирующего винта, рассчитанной по формуле

$$R_B = 0,25v^2D^2 \quad (1)$$

где R_B – сопротивление нератирующего винта; v – скорость движения; D – диаметр винта.

Полученные в процессе испытаний данные были аппроксимированы зависимостью вида формулы адмиралтейских коэффициентов

$$R = \rho \frac{\Delta^n v^m}{c}. \quad (2)$$

Коэффициенты n , m , c были найдены методом наименьших квадратов. Для упрощения расчетов зависимость (2) была линеаризована относительно искомых коэффициентов путем логарифмирования, т.е.

$$\ln R = \ln \rho + m \ln \Delta + n \ln v - \ln c. \quad (3)$$

Дальнейшие вычисления были выполнены в соответствии со стандартной процедурой метода наименьших квадратов и дополнительных комментариев не требуют.

В результате были получены следующие величины искомых коэффициентов: $n=0,53$; $m=1,66$; $c=9,08$. Таким образом, формула (2) окончательно имеет следующий вид

$$R = \rho \frac{\Delta^{0,53} v^{1,66}}{9,08}. \quad (4)$$

Графики зависимости (4) для ботов проектов 333 и 888 приведены на рис. 10. При практически равных водоизмещениях (табл. 1) график гипотетической зависимости для бота проекта 555, не проходившего натурные буксировочные испытания, совпадает с аналогичным графиком для бота 888. Видно, что расчетные значения хорошо согласуются с результатами натурных испытаний при скоростях выше 4 узлов (2,06 м/с). При меньших скоростях наблюдаются существенные расхождения, что не имеет принципиального значения, так как расчеты мощности главного двигателя и винта выполняются с учетом номинальных режимов движения. Таким образом, формула (4) может использоваться для определения буксировочного сопротивления ботов с аналогичными обводами в диапазоне скоростей 6-8 узлов при водоизмещениях 30-50 тонн.

3. Анализ применимости известных методов определения сопротивления к маломерным судам с упрощенными обводами

В этом разделе выполнена оценка возможности использования ряда известных методик для определения сопротивления рассматриваемых судов путем сопоставления расчетных значений, полученных по этим методикам, с результатами натурных буксировочных испытаний.

Был проведен сравнительный анализ результатов расчета сопротивления воды движению маломерных судов с упрощенными обводами по методикам В. А. Ерошина, Э. Э. Папмеля и Дж. Холтропа [1, 2, 3].

Метод Э. Э. Папмеля разработан для определения буксировочной мощности судов и может быть применен для широкого спектра судов – от портовых буксиров до крупнотоннажных танкеров. Формула Э. Э. Папмеля имеет вид

$$P_e = 0,7355 \cdot \frac{V}{L} \cdot \frac{v_s^3}{C} \cdot \frac{x}{\lambda \cdot \psi_k^{0,5}}. \quad (5)$$

где V – объемное водоизмещение судна, m^3 ; v_s – скорость, узл; L – длина судна, м; $\psi_k = 10 \cdot (B/L) \cdot \delta$ – коэффициент, характеризующий форму корпуса, где δ – коэффициент общей полноты, B – ширина судна, м; $\lambda = 0,7 + 0,03 \cdot L/0,5$ – поправочный коэффициент на длину судна; x – множитель, учитывающий сопротивление выступающих частей и равный 1 при

одновальной установке; C – коэффициент, значение которого определяют по диаграмме Э. Э. Пампеля.

Данный метод можно применить, если характеристики теоретического чертежа лежат в следующих пределах: $B/d = 1,5–3,5$; $L/B = 4–11$; $\delta = 0,35–0,80$.

Метод В. А. Ерошина. С учетом существенных различий линейных размеров корпусов добывающих судов и параметров их формы была разработана единая методика расчета сопротивления движению для больших, средних и малых добывающих судов по схеме разделения буксировочного сопротивления (6) на составляющие.

$$R = \rho \cdot \frac{v^2 \cdot \Omega}{2} \left(C_{F0} + C_A + C_{AP} + (C_\phi \cdot C_{LB} \cdot C_{Bd} \cdot C_\beta \cdot \frac{C_{\chi c}}{C_{\phi 0}}) \right) \cdot 10^{-3} \quad (6)$$

где ρ – плотность среды, т/м³; v – скорость, м/с; Ω – площадь смоченной поверхности, м²; C_{F0} – коэффициент трения; C_A – надбавка на шероховатость; C_{AP} – коэффициент выступающих частей; C_ϕ , C_{LB} , C_{BT} , C_β , $C_{\chi c}$ – коэффициенты влияния формы корпуса рассматриваемого судна на сопротивление; $C_{\phi 0}$ – базовый коэффициент сопротивления.

Метод Дж. Холтропа расчета сопротивления базируется на измерениях сопротивления модели судна в бассейне и на вычислении большого количества коэффициентов, зависящих от формы корпуса, скорости и других параметров. Формулы представляют собой достаточно сложные зависимости, включающие вспомогательные коэффициенты, которые в свою очередь также определяются с помощью эмпирических формул, учитывающих не только характеристики формы корпуса судна, но и его ходовые качества. Общее сопротивление определяется по формуле

$$R_{\text{Хол}(6)} = R_F(1 + k_1) + R_{AP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (7)$$

где R_F – сопротивление трения; $1+k_1$ – форм-фактор, характеризующий долю вязкостного сопротивления корпуса судна по отношению к R_F ; R_{AP} – сопротивление выступающих частей; R_W – волновое сопротивление; R_B – сопротивление бульба; R_{TR} – сопротивление погруженной части кормы; R_A – корреляционная составляющая сопротивления модели.

Графическая интерпретация результатов расчетов по трем методикам в сопоставлении с кривыми, полученными по формуле (4) на основе данных буксировочных испытаний, приведена на рис. 11.

Расчеты по методу Э.Э. Пампеля были выполнены только для бота проекта 333 и ввиду очевидного несоответствия данным натурных испытаний для остальных ботов не выполнялись.

Кривые, полученные по методу В. А. Ерошина, также ни количественно, ни качественно не согласуются с экспериментальными результатами несмотря на то, что этот метод разработан для добывающих судов в широком диапазоне их разнообразных характеристик.

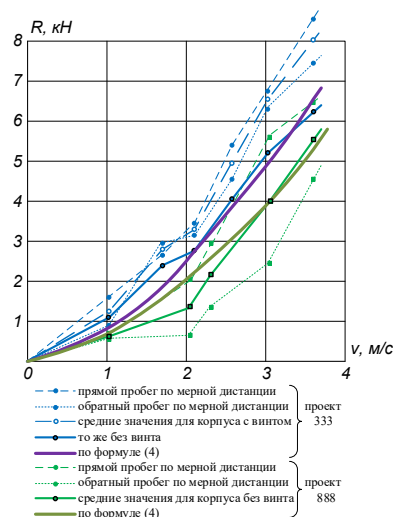


Рис. 11. Сопоставление результатов расчетов сопротивления по известным методикам с данными натурных буксировочных испытаний

Определенный интерес представляют кривые, полученные расчетом по методу Дж. Холтропа. При очевидном количественном несовпадении с результатами натурных испытаний характер кривых качественно близок к форме экспериментальных графиков (рис. 11). В табл. 2 сопоставлены результаты определения сопротивления при буксировочных испытаниях Р_{экс} с расчетными значениями, полученными по методу Дж. Холтропа $R_{\text{Хол}}(7)$ с использованием формулы (7). Здесь же приведены величины отношений $K = R_{\text{экс}} / R_{\text{Хол}}(7)$.

Таблица 2
Сопоставление результатов расчета сопротивления по методу Дж. Холтропа с данными натурных буксировочных испытаний

Скорость, м/с		1,03	2,06	3,09	3,6
Проект 555	$R_{\text{экс}}, \text{кН}$	0,661	2,089	4,095	5,338
	$R_{\text{Хол}}(7), \text{кН}$	0,409	1,167	2,324	3,045
	$R_{\text{нат}} / R_{\text{Хол}}(7)$	1,616	1,790	1,762	1,753
	$R_{\text{Хол}}(8), \text{кН}$	--	2,187	4,355	5,706
Проект 333	$R_{\text{экс}}, \text{кН}$	0,811	2,551	5,003	6,446
	$R_{\text{Хол}}(7), \text{кН}$	0,591	1,368	2,551	3,290
	$R_{\text{нат}} / R_{\text{Хол}}(7)$	1,372	1,865	1,961	1,959
	$R_{\text{Хол}}(8), \text{кН}$	--	2,564	4,780	6,165
Проект 888	$R_{\text{экс}}, \text{кН}$	0,661	2,089	4,095	5,338
	$R_{\text{Хол}}(7), \text{кН}$	0,436	1,102	2,113	2,744
	$R_{\text{нат}} / R_{\text{Хол}}(7)$	1,516	1,896	1,938	1,945
	$R_{\text{Хол}}(8), \text{кН}$	--	2,065	3,960	5,142

Видно, что при скорости 2 узла (1,03 м/с) отношения K для ботов всех трех проектов выпадают из общего ряда, оставаясь для каждого из них практически постоянным при более высоких скоростях. При этом величины K для ботов проектов 888 и 333 почти одинаковы. Разброс значений K в этой группе в диапазоне скоростей от 3 до 7 узлов (1,5–3,6 м/с) лежит в пределах 5%. Значения K для бота проекта 555, сохраняя те же тенденции, что и у первых двух ботов по величине приблизительно на 10% ниже. Это можно объяснить различиями формы кормовой

оконечности. Боты проектов 888 и 333 имеют в корме днищевые були при не очень развитом комовом подзоре между ними (рис. 8 и 4). У бота проекта 555 традиционная форма более развитого комового подзора (рис. 5).

С учетом того, что при скоростях выше 3 узлов значения K для всех трех проектов незначительно отличаются друг от друга и практически постоянны, среднее значение этого коэффициента $K_{ср} = 1,874$ можно использовать в качестве множителя к правой части формулы (7), которая примет вид

$$R_{Холл(8)} = [R_F(1 + k_1) + R_{AP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A] \cdot K_{ср}(8)$$

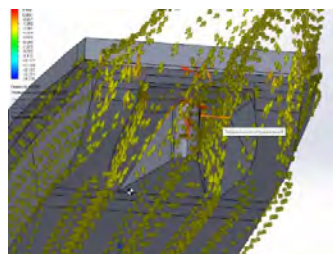
На рис. 11 видно близкое расположение графиков, рассчитанных по формуле (8), и экспериментальных кривых, то есть метод Дж. Холтропа с учетом поправочного коэффициента $K_{ср}$ можно с достаточной точностью использовать для определения сопротивления рассматриваемых маломерных судов с упрощенными обводами.

4. Определение сопротивления воды движению ботов в SolidWorks с использованием приложения Flow Simulation

С целью оценки возможности использования программного продукта SolidWorks для определения сопротивления воды движению ботов были созданы 3d-модели их корпусов и выполнены соответствующие расчеты с использованием приложения Flow Simulation.

Рассматривались корпуса ботов с осадкой по КВЛ в потоке воды при скоростях в диапазоне 2–7 узлов (1,03–3,6 м/с); тип течения – ламинарное и турбулентное. В качестве иллюстрации характер обтекания 3d-модели корпуса бота проекта 333 представлен на рис. 12.

а)



б)

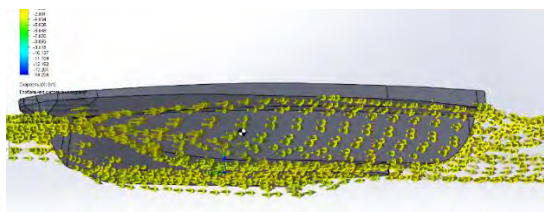


Рис. 12. Характер обтекания 3d-модели корпуса бота проекта 333: а – вид с кормы; б – боковой вид

Графическая интерпретация результатов расчетов в сравнении с данными натурных буксировочных испытаний приведена на рис. 13.

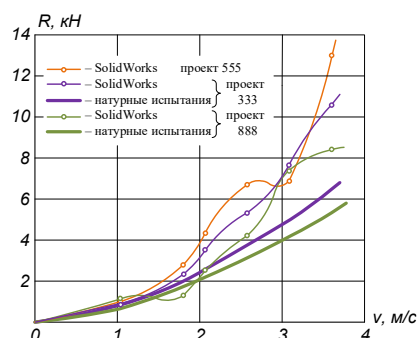


Рис. 13. Сопоставление результатов расчета сопротивления в SolidWorks с данными натурных буксировочных испытаний

Расчеты сопротивления, выполненные в SolidWorks, дают явно завышенные результаты. Кроме того, немоноотонный сложный характер расчетных кривых вряд ли связан с физическими особенностями процесса обтекания корпуса. Скорее его можно объяснить некорректностью использования приложения Flow Simulation применительно к рассматриваемым судам. Например, программа не учитывает возможные срывы потока и завихрения, которые могут возникать на острых кромках корпуса с упрощенными обводами. Кроме того, не учитывается изменение посадки корпуса при изменении скорости – возникновение дифферента на корму. Возможны и другие нюансы, которые в рамках данной работы не рассматривались.

5. Модельные буксировочные испытания корпусов ботов

Натурные буксировочные испытания дают наиболее достоверные результаты, но их проведение связано с целым рядом технических и организационных сложностей. В связи с этим были проведены серийные модельные буксировочные испытания в опытовом бассейне в широком диапазоне водоизмещений (осадок). Модели ботов проектов 333 и 888 в масштабе 1:20 были отпечатаны на 3d-принтере (рис. 14).

а)



б)



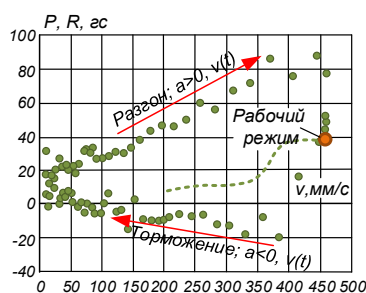
Рис. 14. Модель бота проекта 333 (а) и опытовый бассейн (б)

Опытный бассейн размерами $l \times b \times h = 5 \times 0,6 \times 0,3$ метра снабжен аппаратно-программным комплексом, включающим буксировочную тележку, приводимую в движение с заданной скоростью посредством электрического сервопривода. Максимальная скорость буксировки 50 см/с. Буксировка моделей осуществляется через установленный на тележке аппаратный модуль, содержащий чувствительные элементы тензорезистивного типа для измерения усилий, величина которых в режиме реального времени через Bluetooth передается на персональный компьютер. Специальное программное обеспечение позволяет проводить обработку результатов испытаний, выполнять необходимые расчеты и их графическую интерпретацию.

Пересчет результатов модельных испытаний на натуру осуществлялся в соответствии с теорией подобия Фруда.

Технические возможности бассейна, главным образом, его малая длина и ограниченная скорость тележки, не позволили провести испытания во всем диапазоне скоростей натурных ботов (до 7 узлов) с учетом их пересчета на модели. Максимальная скорость моделей, которую удалось достичь с учетом протяженности участков разгона и торможения, составила 0,46 м/с, что соответствует скорости 4 узла (2,06 м/с) натурного бота. Нижний предел скорости модели также пришлось ограничить величиной 0,23 м/с (2 узла или 1,03 м/с для натурного бота), т. к. при меньших скоростях при малых значениях измеряемых величин существенно возрастает относительная величина погрешностей. На рис. 15 результаты буксировочных испытаний двух моделей при осадках по КВЛ представлены в виде зависимости показаний измерителя прикладываемой к модели продольной силы от скорости движения.

а)



б)

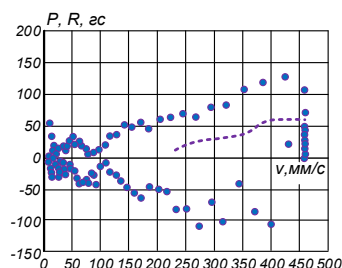


Рис. 15. Зависимость показаний измерителя прикладываемой к модели продольной силы от скорости ее движения для модели проекта 888 (а) и проекта 333 (б)

При обработке результатов испытаний использовался метод математической статистики

при интервальной оценке статистических параметров с вероятностью 95%. На рис. 15 штриховой линией показаны полученные зависимости силы сопротивления движению моделей в интервале скоростей 0,23–0,46 м/с (1,03–2,06 м/с или 2–4 узла для натурного бота).

Следует отметить, что наличие отрицательных значений измеряемых усилий на рис. 15 выглядит парадоксально, но имеет достаточно простое объяснение (рис. 16). При движении модели с постоянной скоростью силоизмеритель фиксирует силу сопротивления движению R . Если измерение производится на участках разгона и торможения, то есть с ускорением того или иного знака, то датчиком фиксируется сумма силы сопротивления R и силы инерции $P_{ин}$, которая при разгоне направлена в ту же сторону, что и сила сопротивления, а при торможении – в противоположную ей сторону. Если сила инерции по абсолютной величине больше силы сопротивления, то при их суммировании появляются отрицательные значения фиксируемой датчиком силы.

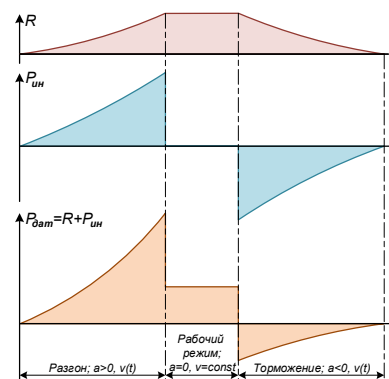


Рис. 16. Силы, фиксируемые силоизмерителем при буксировке моделей в зависимости от времени

Рис. 15, а, интерпретирует силы, представленные на рис. 16, в зависимости от скорости движения модели.

Сопоставление результатов модельных испытаний после их пересчета (штриховые линии) с результатами буксировочных испытаний натурных ботов в диапазоне скоростей 2–4 узла (1,03–2,06 м/с) приведено на рис. 17.

Кривые, соответствующие модельным испытаниям, для обоих ботов имеют сложный немонотонный характер, который вряд ли можно отнести к какому-либо физическим явлениям. Это, видимо, объясняется погрешностями измерений при малых значениях измеряемых величин.

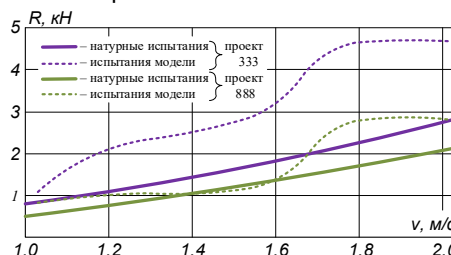


Рис. 17. Сопоставление результатов натурных и модельных испытаний ботов проектов 333 и 888

Что касается соотношения величин, то для бота проекта 888, кривые натурных и модельных испытаний лежат достаточно близко друг к другу. Для

бота проекта 333 наблюдается значительное расхождение результатов. В обоих случаях значения сопротивлений, полученных при модельных испытаниях, превосходят соответствующие результаты натурального эксперимента. Таким образом, полученные в описанных условиях результаты модельных испытаний не могут быть использованы при практических расчетах.

Заключение

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований на основе

натурных буксировочных испытаний малых судов с упрощенными обводами получена формула для определения их буксировочного сопротивления. Проведено сопоставление полученных результатов с результатами определения сопротивления по известным методикам, а также численным методом и в процессе модельных буксировочных испытаний. Установлено, что приемлемые результаты для рассматриваемых судов можно получить по методике Дж. Холтропа при введении в расчетную зависимость поправочного коэффициента.

Литература

1. Башкатов В. А., Орлов П. П., Федосов М. И. Гидрореактивные пропульсивные установки. Л., Судостроение, 1973. 136 с.
2. Войткунский Я.Ш. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. Том 1. Справочник по теории корабля. Л., Судостроение, 1985. 384 с.
3. К вопросу об определении сопротивления судна по результатам буксировочных испытаний его моделей в опытовом бассейне. Л., «Судостроение», 1958, № 3. С. 4–7.
4. Holtrop J., Mennen G.G.J. An approximate power prediction method. International Shipbuilding Progress. 1982; 29(335) 170 p.
5. Бугаев В. Г. CAD/CAM/CAE-системы. Автоматизированное проектирование судов: учеб. пособие/В.Г. Бугаев; Дальневосточный государственный технический университет. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2008. 250 с
6. Бугаев В. Г., Дам Ван Тунг, Бондаренко Ю. В. Оптимизация формы корпуса рыболовных судов. Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2020. № 2(43). с. 35–45
7. А. А. Ляпков, Ю.В. Донцов. Изготовление деталей с помощью 3D-принтера: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Полимерные аддитивные технологии» для слушателей ФПК. Томск: Томский политехнический университет, 2016. 25 с.
8. Гребенникова, И.В. Методы математической обработки экспериментальных данных: учебно-методическое пособие. И. В. Гребенникова. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 124 с.
9. Л.В. Коломиец, Н. Ю. Поникарова. Метод наименьших квадратов: метод. Указания. Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. 32 с
10. В. О. Бессонова, А. А. Воробьева. Малая плавучая автономная рыбопромысловая база. Молодежь и научно-технический прогресс: материалы региональной научно-практической конференции. Владивосток, 01 мая – 30 2021 года. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2021. С. 449–454.
11. Сравнительный анализ методов расчетов сопротивления воды для маломерных рыбопромысловых судов с упрощенными обводами. И. А. Новосельцев, В. О. Бессонова, А. А. Воробьева. Наука, техника, промышленное производство: история, современное состояние, перспективы: Материалы региональной научно-практической конференции студентов и аспирантов, Владивосток, 13–28 декабря 2021 года. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2022. С. 252–256.

References

1. Bashkatov V.A., Orlov P.P., Fedosov M.I. Hydro-reactive propulsion systems. L., Shipbuilding, 1973. 136 p.
2. Voitkunsky Ya.Sh. Hydromechanics. Resistance to the movement of ships. Ship propulsion systems. Volume 1. Handbook of ship theory. L., Shipbuilding, 1985. 384 p.
3. On the issue of determining the resistance of a vessel based on the results of towing tests of its models in the experimental pool. L., "Shipbuilding", 1958, No. 3. pp. 4-7.
4. Holtrop J., Mennen G.G.J. An approximate method for predicting power. International progress in shipbuilding. 1982; 29(335) 170 p.
5. Bugaev V. G. CAD/CAM/CAE-sistemy. Avtomatizirovannoe proektirovanie sudov: ucheb. posobie/V.G. Bugaev; Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj tehnikeskij universitet. Vladivostok: Izd-vo DVGTU, 2008. 250 s
6. Bugaev V. G., Dam Van Tung, Bondarenko Ju. V. Optimizacija formy korpusa rybolovnyh sudov. Vestnik Inzhenernoj shkoly DVFU. 2020. № 2(43). с. 35–45
7. A. A. Ljapkov, Ju.V. Doncov. Izgotovlenie detalej s pomoshh'ju 3D-printera: metodicheskie ukazaniya k vypolneniju laboratornyh rabot po kursu «Polimernye additivnye tehnologii» dlja slushatelej FPK. Tomsk: Tomskij politehnicheskij universitet, 2016. 25 s.
8. Grebennikova, I.V. Metody matematicheskoy obrabotki jeksperimental'nyh dannyh: uchebno-metodicheskoe posobie. I. V. Grebennikova. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2015. 124 s.
9. . L.V. Kolomic, N. Ju. Ponikarova. Metod naimen'shij kvadratov: metod. Ukazaniya. Samara: Izd-vo Samarskogo universiteta, 2017. 32 s
10. V. O. Bessonova, A. A. Vorob'eva. Malaja plavuchaja avtonomnaja rybopromyslovaja baza. Molodezh' i nauchno-tehnicheskij progress: materialy regional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii. Vladivostok, 01 maja – 30 2021 goda. Vladivostok: Dal'nevostochnyj federal'nyj universitet, 2021. S. 449–454.
11. Sravnitel'nyj analiz metodov raschetov soprotivleniya vody dlja malomernyh rybopromyslovyh sudov s uproshhennymi obvodami. I. A. Novosel'cev, V. O. Bessonova, A. A. Vorob'eva. Nauka, tehnika, promyshlennoe

производство: istorija, sovremennoe sostojanie, perspektivy: Materialy regional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov i aspirantov, Vladivostok, 13–28 dekabrja 2021 goda. Vladivostok: Dal'nevostochnyj federal'nyj universitet, 2022. S. 252–256.

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

Аносов Анатолий Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор департамента морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, 190121, Владивосток, Аякс, 10, С730, e-mail: anosov49@mail.ru

Anatolij P. Anosov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of marine technic an transport, Far East Feeral Univercity, Vlaivostok, Ajaks, 10, C730 e-mail: anosov49@mail.ru

Антоненко Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор

Sergej V. Antonenko, Dr. Sci. (Eng), Professor

Бессонова Виктория Олеговна, аспирант департамента морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, 190121, Владивосток, Аякс, 10, e-mail: bessonova.vo@dvfu.ru

Viktoriya O. Bessonova, graduate student of the Department of marine technic an transport, Far East Federal University, Vladivostok, Ajaks, 10, e-mail: bessonova.vo@dvfu.ru

Воробьева Анна Андреевна, аспирант департамента морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, 190121, Владивосток, Аякс, 10, e-mail: vorobyova.aand@dvfu.ru

Anna A. Vorob'eva, graduate student of the Department of marine technic an transport, Far East Federal University, Vladivostok, Ajaks, 10, e-mail: vorobyova.aand@dvfu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 05.02.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 08.02.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 10.02.2024.

Научная статья

УДК 629.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.004>

Инновационные технологии в развитии морского транспорта

Малыгин И.Г.¹ malygin_com@mail.ru, Гурлев И.В.¹ gurleff@mail.ru¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. В статье рассмотрены некоторые зарубежные и российские проекты, касающиеся перспектив инновационного технологического развития морского транспорта. Судостроительные компании в соответствии с международной конвенцией по предупреждению загрязнения окружающей среды с судов вынуждены предъявлять жесткие требования к работе судовых двигателей с целью сокращения вредных выбросов в атмосферу оксидов азота, серы, углерода, сажи при сгорании судового дизельного топлива. Становится актуальным разработка и эксплуатация гибридных судовых силовых установок; поиск и применение на морских судах альтернативных более чистых в экологическом плане видов топлива: метанола, жидкого водорода, сжиженного природного газа, биотоплива на основе растительного масла, солнечной энергии, энергии ветра, ядерного топлива и др. С целью повышения эффективности работы морских судов и уменьшения расходов на содержание судов, обеспечение пожарной безопасности и др. разрабатываются роботы-пожарные, роботы для очистки корпусов судов от водорослей и морских организмов. С целью уменьшения влияния человеческого фактора на безопасность мореходства разрабатываются беспилотные морские суда.

Ключевые слова: морские суда, гибридные двигатели, биотопливо, атомная энергия, роботизация, беспилотные суда.

Финансирование: работа выполнена в рамках исполнения государственного задания ИПТ РАН № 075-00602-24-0 на 2024 год и на плановый период 2025 и 2026 годов за счет средств предоставленной Минобрнауки России субсидии (соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 18.01.2024 №075-03-2024-666)

Для цитирования: Малыгин И.Г., Гурлев И.В. Инновационные технологии в развитии морского транспорта, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 41—49. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.004

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.004>

Innovative technologies in the development of maritime transport

Igor G. Malygin¹ malygin_com@mail.ru, Igor V. Gurlev¹ gurleff@mail.ru¹N.S. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences

Annotation. The article discusses some foreign and Russian projects related to the prospects of innovative technological development of maritime transport. Shipbuilding companies, in accordance with the international convention on the Prevention of environmental pollution from ships, are forced to impose strict requirements on the operation of marine engines in order to reduce harmful emissions of nitrogen oxides, sulfur, carbon, soot into the atmosphere during the combustion of marine diesel fuel. The development and operation of hybrid marine power plants is becoming relevant; search for and use of alternative environmentally cleaner fuels on ships: methanol, liquid hydrogen, liquefied natural gas, biofuels based on vegetable oil, solar energy, wind energy, nuclear fuel, etc. In order to increase the efficiency of marine vessels, reduce the cost of maintaining ships, ensuring fire safety, etc., firefighting robots, robots for cleaning ship hulls from algae and marine organisms are being developed. In order to reduce the impact of the human factor on the safety of navigation, unmanned naval vessels are being developed.

Keywords: marine vessels, hybrid engines, biofuels, nuclear energy, robotization, unmanned vessels.

Financial Support: the work was carried out as part of the execution of the state task of the IPT RAS № 075-00602-24-0 for 2024 and for the planned period of 2025 and 2026 at the expense of the 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 18 January 2024 № 075-03-2024-666)

For citation: Igor G. Malygin, Igor V. Gurlev, Innovative Technologies in the development of Maritime Transport, Marine Intelligent Technologies. 2024. № 1 part 1, P. 41—49. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.004

Введение

Во многих странах мира тестируются и уже эксплуатируются новые транспортные средства, использующие экологически чистые виды топлива, разрабатываются и эксплуатируются беспилотные транспортные средства и т.д.

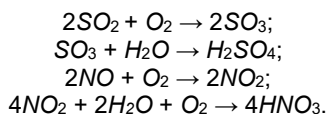
Эти изменения происходят не только в сфере автомобильного, железнодорожного, авиационного, но также и морского транспорта [1].

Морской транспорт всегда играл и играет важную роль в жизни человеческой цивилизации с целью обеспечения перемещения людей и грузов. В настоящее время в связи с ростом количества морских судов, увеличением дальности и объемов перевозок, в связи с масштабным использованием судового дизельного топлива увеличивается загрязнение не только мирового океана и атмосферы, но и в целом окружающей среды, растет стоимость углеводородного топлива, доставляемых

товаров, появляются проблемы с логистикой и временем доставки пассажиров и грузов. В крупных морских судостроительных компаниях с целью снижения накладных расходов и других материальных затрат проводятся работы по использованию новых более экологически чистых видов топлива; созданию гибридных судовых двигателей; ведутся работы по созданию беспилотных морских судов; для сокращения времени погрузки и разгрузки осуществляется внедрение робототехники. Для решения перечисленных и многих других проблем с целью повышения эффективности работы морских транспортных систем разрабатываются интеллектуальные транспортные системы (ИТС). По всем указанным направлениям во многих странах мира проводятся исследования и работы, в том числе и в России.

Выбросы в атмосферу при работе судовых дизельных двигателей

При сжигании судового дизельного топлива самыми вредными являются оксиды серы (SO_2 , SO_3), оксиды азота (NO , NO_2) и сажа (C), которые выбрасываются в атмосферу, оказывая на нее существенное негативное влияние. Оксиды серы и азота в результате реакции с влагой атмосферы, превращаются в кислотные дожди из слабо концентрированных серной и азотной кислот, делая воду подкисленной:



Так, например, морское транспортное судно (танкер, сухогруз), имеющее размеры стандарта PANAMAX, может расходовать в среднем до 33 тонны топлива в сутки.

Используя данные об удельных выбросах вредных веществ в атмосферу свободно горящего дизельного топлива, можно ориентировочно определить количество выбросов вредных веществ при сгорании судового топлива в течение одного рейса.

Основная формула для расчета количества вредных веществ, выброшенных в атмосферу:

$$M = m_i \times G,$$

где M – масса загрязняющего вещества, выброшенного в атмосферу;

m_i – удельный выброс загрязняющего вещества на единицу массы сгоревшего дизельного топлива;

G – масса сгоревшего дизельного топлива.

С учетом значений удельных выбросов вредных веществ для дизельного топлива, где: $m(SO_2) = 0,0047$ т/т; $m(NO_2) = 0,0261$ т/т; $m(\text{сажа}) = 0,0129$ т/т – определяется количество указанных вредных веществ, выброшенных в атмосферу для морских судов за расчетное время [2].

Существующий в настоящее время мировой торговый флот – это морские судна водоизмещением более 1000 тонн, занятые в перевозке грузов и пассажиров, кроме буксиров, рыболовных судов, морских нефтяных платформ и т.п. Общее количество таких судов по данным ООН в 156

странах мира составляет около 40 000 и практически все они работают на судовом дизельном топливе. Поэтому формулы расчета вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу, еще долгое время будут актуальны.

Гибридные (смешанные) силовые установки

Вместе с тем на смену традиционным судовым дизельным двигателям приходят гибридные силовые установки. За счет применения гибридной технологии можно экономить топливо, уменьшать вредное воздействие на окружающую среду, снижать расходы на обслуживание основных двигателей. Прогнозируется, что постепенно судовые гибридные силовые установки вытеснят широко используемые судовые дизельные двигатели, работающие на дизельном судовом топливе или на мазуте, т.к. морское судоходство вынуждено в соответствии с международной конвенцией принимать жесткие меры по сокращению выбросов оксидов азота (NO_x), серы (SO_x), углерода (CO_x) и сажи [3].

Норвежский круизный оператор Hurtigruten LTD завершил весной 2019 г. постройку и оснастил круизный лайнер длиной 140 м ледового класса Arc6 MS Roald Amundsen гибридными двигателями на основе дизельного и электрического двигателей. Всего планируется постройка 4-х таких круизных судов (рис. 1).



Рис. 1. Круизный лайнер ледового класса Arc6 «MS Roald Amundsen»

Лайнер Roald Amundsen стал первым морским гибридным судном, который имеет традиционный дизельный и электрический двигатели, а также аккумуляторные батареи, которые заряжаются от работающего дизеля. После зарядки батарей циклически отключаются дизельные двигатели и включаются электродвигатели. Во время рейса электродвигатель способен обеспечить до одного часа непрерывной работы. В среднем электродвигатель обеспечивает до 20% пути лайнера на электротяге. Соответственно, на такой же процент снижаются вредные выбросы, загрязняющие окружающую среду. Таким образом, лайнер с гибридным двигателем – это первый шаг в сторону снижения вреда экологии со стороны морского и океанического флота. Зимой Roald Amundsen совершает круизы у берегов Антарктиды, летом – в Арктике у Шпицбергена.

Отмечается, что работа электродвигателя настолько тихая, что пассажиры могут слышать треск льда и голоса полярных птиц и животных. Круизный лайнер может брать на борт почти 550 пассажиров. Он оборудован кинотеатром, бассейном, сауной, а половина кают имеет собственные балконы. На носу

корабля обустроена отапливаемая смотровая площадка.

Многие инженерные решения в корабле пока носят экспериментальный характер. В течение эксплуатации многие узлы и агрегаты судна и гибридной силовой установки будут тестироваться и совершенствоваться [4].

Альтернативные виды топлива

В настоящее время в мире исследуют и тестируют различные вещества, которые могут быть использованы в качестве альтернативного топлива для судовых дизельных двигателей. Например, консорциум Green Maritime Methanol изучает стоимость и целесообразность установки на борту **метаноловых топливных систем**. Они отобрали девять судов на стадии от проектов до реализованных моделей компаний Boskalis, Van Oord, Королевского флота Нидерландов и Wagenborg Shipping. Длина судов варьируется от 40 до 160 метров, тоннаж – от 300 до 23 000 тонн; мощность от 1 до 12 МВт.

Российские и японские компании также подписали соглашение о намерениях по созданию на верфях России судов, **работающих на метаноле**. Церемония подписания меморандума состоялась на полях Восточного экономического форума (ВЭФ-2021).

Проект строительства работающих на метаноле судов будут разрабатывать корпорация ВЭБ.РФ, банк ВТБ, ЕСН, Минвостокразвития и японские компании Marubeni Corporation и Mitsui O.S.K. Lines.

В Находке и Амурской области планируется производить метанол как топливо для морских судов [5].

Viking Neptune – первое круизное судно, построенное на итальянской верфи Fincantieri в 2022 году, для международной круизной компании Viking Cruises (штаб-квартира в Швейцарии), на котором установлена **топливная система, работающая на жидком водороде**. Длина лайнера составляет 228 метров, водоизмещение 47842 тонн, пассажировместимость 930 человек и 500 членов экипажа.

Водородные топливные элементы получили принципиальное одобрение для использования на морских судах от международного сертификационного и классификационного общества «DNVGL». Поэтому разработчики будут испытывать водородные топливные элементы в качестве альтернативной силовой установки для больших круизных судов. При этом все, что необходимо для его функционирования, это газообразный водород и обычный воздух (рис. 2).



Рис. 2. Круизный лайнер Viking Neptune, работающий на водородном топливе

В настоящее время разрабатывается более крупное судно, планируется установка большего водородного бака, модулей топливных элементов и связанных с ними вспомогательных систем. Строительство четырех круизных лайнеров для Viking Cruises, работающих на водородных топливных элементах, запланировано на верфи Fincantieri в 2026-2028 годах [6].

Закладка первого в России инновационного прогулочно-экскурсионного судна, работающего **на водородном топливе**, состоялась 28 февраля 2023 г. на Зеленодольском судостроительном заводе имени А.М. Горького в Татарстане. Судно проекта 00393 разработано ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (ЦКБ «Балтсудпроект»). Его длина составляет около 15 м, ширина – 3,3 м, осадка – 0,54 м. Пассажировместимость составляет 10 человек. Максимальная скорость составляет 12 км/ч, продолжительность рейса – 5 часов [7].

В начале октября 2023 года компания АО «Ситроникс» (Sitronics group) провела успешные испытания первого в России прототипа судна с электрохимическим генератором (ЭХГ), вырабатывающим энергию из водорода (рис. 3). Для этого инновационного проекта Центром водородных технологий АФК «Система» был разработан генератор на топливных элементах. Установка интегрирована в энергосистему прогулочно-экскурсионного судна-катамарана. Испытания прошли в акватории Невы в Ленинградской области у верфи Emperium. В Центре водородных технологий и Sitronics group эксперимент считают удавшимся [8].



Рис. 3. Прогулочно-экскурсионное судно-катамаран «Серебрянка» - первое российское судно-прототип, работающее на водороде

Необходимость разработки и внедрения судовых энергетических установок, работающих на альтернативных источниках энергии, определяется целями сокращения выбросов парниковых газов и газов (ПГ) и удовлетворения международных и национальных экологических требований. Переход на водородное топливо хорошо согласуется с Климатической доктриной Российской Федерации и международными стратегиями по сокращению выбросов ПГ [9].

Применение водородного топлива, с одной стороны, обеспечит возможность достижения заявленных экологических целей, с другой стороны, на сегодняшний день имеет ряд существенных ограничений, связанных с нерешенностью вопросов обеспечения безопасности, получения водорода и отсутствием инфраструктуры [10].

В настоящее время стали активно строиться **суда, работающие на сжиженном природном**

газе (СПГ). Сегодня в мире насчитывается более 135 судов с гибридными СПГ-двигателями и 1 круизный лайнер, полностью работающий на СПГ – AIDANova, принадлежащий Carnival Cruises (круизная компания британско-американского концерна Carnival Corporation & plc). Планируется, что к 2025 г. будет построено еще 140 судов с гибридными СПГ-двигателями.

В России с 2016 года эксплуатируется газовоз «Кристоф де Маржери», работающий на СПГ, судно принадлежит группе компаний «Совкомфлот» (рис. 4).



Рис. 4. Газовоз «Кристоф де Маржери»

Танкер-газовоз ледового класса Arc7 был спущен на воду в 2016 году и получил свое название в честь французского бизнесмена, главного исполнительного директора концерна Total Кристофа де Маржери, который трагически погиб в московском аэропорту «Внуково». «Кристоф де Маржери» (Christophe de Margerie) являлся первым из пятнадцати танкеров-газовозов для проекта «Ямал СПГ», имеет габариты: длина – 299 м; ширина – 50 м; максимальная осадка – 11,4 м; высота борта – 26,5 м.

Основными движителями судна являются три винторулевые колонки AZIPOD фирмы-производителя ABB (Asea Brown Boveri – шведско-швейцарская транснациональная корпорация, специализирующаяся в области электротехники и энергетического машиностроения), которые представляют из себя электродвигатели, способные вращаться вокруг вертикальной оси и обеспечивающие отличный показатель маневренности, а также проходимость по льду толщиной до 1,5 метров в обычном ходовом режиме, и до 2,5 метров в режиме движения кормой вперед (рис. 5).



Рис. 5. Винторулевая колонка «AZIPOD»

Наличие винторулевых колонок также говорит о том, что судно осуществляет перемещение

посредством использования технологии электродвижения (Diesel-electric propulsion). Средняя скорость при движении во льдах достигает 7 узлов (около 13 км/ч), на чистой воде – 20 узлов (около 37 км/ч). Кроме того, судовые двигатели способны работать на экологически чистом топливе – СПГ, для перевозки которого и предназначен «Кристоф де Маржери».

В августе 2017 года «Кристоф де Маржери» самостоятельно (без ледокольной проводки) завершил переход через Северный морской путь, получив при этом статус первого в мире торгового судна, преодолевшего данный маршрут, и за рекордно-короткие сроки. Длительность перехода составила 6,5 суток.

На данный момент газовоз продолжает заниматься поставками природного газа из ключевого порта проекта «Ямал СПГ» – Сабетта на Обской губе (Ямало-Ненецкий автономный округ) в страны Азии и Европы, доказывая при этом рентабельность использования Северного морского транспортного коридора (СМТК) в качестве маршрута для доставки природных ресурсов [11].

Использование СПГ в качестве топлива для большинства морских судов в России и других странах, несмотря на то, что судовые двигатели на СПГ работают на 20% эффективнее, чем при использовании дизельного топлива, сдерживается по многим причинам: отсутствие соответствующей инфраструктуры для поставки и хранения СПГ в портах пребывания; высокая стоимость переоборудования судовых энергетических установок, т.к. на действующих судах не предусмотрены места для размещения низкотемпературных емкостей большого объема, практически вдвое превосходящих габариты судовых топливных цистерн; снижение эффективности аналогичного морского транспортного средства, т.к. для размещения системы хранения СПГ приходится выделять объемы, которые на судах занимает полезная нагрузка; недостаточность или отсутствие производства судового оборудования для работы на СПГ; отсутствие квалифицированных кадров для работы с СПГ [12].

Контейнеровоз судоходной компании Samskip (Нидерланды) Samskip Endeavour вместимостью 800 TEU, габариты судна: длина – 141 м; ширина – 22 м; впервые в истории в 2018 г. **выполнил рейс на переработанном растительном масле вместо судового дизельного топлива** (рис. 6).



Рис. 6. Контейнеровоз Samskip Endeavour

Применение данного вида биотоплива произошло в рамках программы GoodShipping. Судно взяло на борт 22 тысячи литров отработанного пищевого

растительного масла, поставленного GoodFuels Marine (Нидерланды), и совершило рейс из Роттердама в Халл (Великобритания). Длина траектории рейса более 360 км (около 200 морских миль). В результате использования биотоплива были сокращены на более чем 36 тонн выбросы CO₂ в атмосферу, а также значительно сокращены выбросы окислов серы, углерода и сажи [13].

В США ведется разработка биотоплива из морских водорослей с высоким содержанием масла. Американские компании ExxonMobil и Synthetic Genomics собираются к 2025 году достичь мощностей, позволяющих вырабатывать 10 тысяч баррелей в день **топлива из морских водорослей**. Планируется, что использовать его смогут не только суда, но и автомобили, и самолеты [14].

Первый серийный катамаран, **использующий для работы судовых электродвигателей солнечную энергию**, был спущен на воду весной 2020 г. По словам разработчиков из Azura Marine (Сингапур) новое судно способно безостановочно плыть, используя исключительно солнечную энергию. Судно оборудовано солнечными батареями и электродвигателем, благодаря которым оно способно плыть без расхода топлива и остановок для заправки (рис. 7).



Рис. 7. Морская яхта-катамаран «Aquanima»

Разработчики обещают плавание без затрат на покупку топлива и неприятных запахов, вибрации дизеля и загрязнения океана. Также данное судно не нуждается и в пополнении запасов воды в порту – оно оборудовано установкой по опреснению и очистке морской воды. Длина Aquanima – 40 м, ширина – 6 м.

За световой день катамаран на солнечной энергии может пройти до 120 морских миль. Излишки солнечной энергии запасаются для использования и освещения в темное время суток. Общая площадь гелиопанелей – 55 кв. м. При желании на катамаран можно поставить мачту и оборудовать парусами. Цена такой яхты в базовой комплектации составляет 500 тысяч евро [15].

Шведский консорциум, состоящий из судоходной компании Wallenius Marine, Королевского технологического института Швеции и консультационного бюро SSPA, собирается в конце 2024 г. спустить на воду версию парусника-роллера, **использующего для своего движения энергию ветра**, способного взять на борт до 7000 автомобилей. При этом часть финансирования предоставляет Транспортная администрация Швеции. Длина грузового парусника XXI века составляет 200 метров, ширина – 40, высота – 100

метров, включая паруса. Высота парусов около 80 метров (рис. 8).



Рис. 8. Шведский парусник-роллер

По подсчетам разработчиков, за один такой рейс при средней скорости в 10 узлов (18,5 км/ч) парусник выбросит в атмосферу на 90% меньше CO₂, чем современные транспортные суда. При этом по себестоимости он лишь ненамного дороже, чем традиционные роллеры – суда, предназначенные для перевозки колесного транспорта. Единственный недостаток использования силы ветра для движения по воде в том, что это занимает больше времени. Обычное грузовое судно преодолевает Северную Атлантику за 7 дней, а инновационному паруснику понадобится примерно 12, однако он практически не загрязняет атмосферу. По соображениям обеспечения безопасности судоходства при отсутствии ветра, а также для входа и выхода из порта парусник будет оснащен электрическими двигателями, использующих **водородное топливо** [16].

В России широко используются суда на **атомном топливе** – это первый вид альтернативного топлива, который был использован в мире на морских судах. Создан ледокольный флот, состоящий из атомных ледоколов и лихтеровоза «Севморпуть». В ноябре 2023 г. введен в эксплуатацию третий из пяти атомных ледоколов – ледокол «Урал» ЛК-60Я проекта 22220 (рис. 9).



Рис. 9. Атомный ледокол «Урал»

За время существования атомного ледокольного флота с 1957 г. в СССР и затем в России за более чем 65 лет не было ни одной ядерной аварии или выбросов радиоактивных веществ сверх допустимых пределов в окружающую среду, а также происшествий связанных с эксплуатацией судовых реакторных установок.

Фактический выброс радиоактивных веществ в атмосферный воздух за 2022 год с атомных судов и береговых объектов ФГУП «Атомфлот» составил

около 0,009% от ПДВ (предельно допустимого выброса) [17].

Роботизация на морских судах

На морских судах начинает реализовываться процесс применения робототехники. Научно-исследовательская лаборатория ВМС США в сотрудничестве с Virginia Tech (высший военный колледж, подразделение университета штат Пенсильвания) разработала автономного судового **пожарного робота SAFFiR** (Shipboard Autonomous Firefighting Robot) в виде робота-гуманоида. Подобная конструкция, по мнению разработчиков, позволит ему более эффективно передвигаться в стесненных судовых условиях. SAFFiR сможет автономно передвигаться по кораблю и взаимодействовать с людьми. Робот вооружен камерой, датчиком газа, инфракрасной стереокамерой. Он может использовать огнетушители и бросать гасящие пламя гранаты. Встроенный аккумулятор позволяет роботу работать в течение 30 минут. SAFFiR также будет способен работать в аварийной команде. Робота предполагается научить определять главного среди членов команды и понимать его жесты. При необходимости такого робота-гуманоида также можно будет использовать и в боевых действиях (рис. 10).



Рис. 10. Судовой пожарный робот-гуманоид

Однако пока такой пожарный робот не может полностью заменить человека при пожаротушении и проведении аварийно-спасательных работ, но он может работать в задымленных помещениях при температуре до +500°C, способен открыть пожарный кран, управлять перекрытым ручным пожарным стволом (см. рис. 9), принести пожарный шланг (рукав) или найти пострадавших людей в неосвещенных труднодоступных местах. Команды на выполнение действий он получает с консоли оператора. В планах инженеров-разработчиков обеспечить полную автономность SAFFiR и практически полностью устранить команду судна от участия в тушении возможного пожара [18].

Компания SeaRobotics (США) совместно с NAVSEA (США) и ONR (Великобритания) разработала автономную подводную систему очистки корпуса судна. Известно, что подводная часть судов в процессе эксплуатации обрастает водорослями и другими организмами, что негативно сказывается на мореходных качествах и увеличивает расход топлива. **Робот HullBUG** (биомиметический подводный уход за корпусом) уже работает – он эффективно **очищает корпус судна**, что помогает снизить расход топлива. Робот представляет собой небольшое автономное устройство весом от 30 до 40

кг, которое имеет четыре колеса и присасывается к корпусу судна, создавая зону отрицательного давления между собой и днищем (рис. 11).



Рис. 11. Робот HullBUG для очистки корпуса судна

Робот перемещается по поверхности корпуса судна и очищает его от загрязнений. Управление перемещениями робота осуществляется с помощью датчиков. Система небольшая, недорогая, осуществляет очистку судов в доке. Благодаря частой очистке система HullBUG обеспечивает минимальное загрязнение корпусов, тем самым уменьшая потребность в агрессивной очистке и уменьшая зависимость от вредных для окружающей среды противообрастающих покрытий [19].

В России специалисты из Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (СПбГМТУ) создали уникального робота, который поможет очистить корпуса судов от водорослей и микроорганизмов прямо в море.

Корпуса судов чистят, как правило, в доках или при стоянке судна привлекают водолазов. И оба этих способа сложны и дорого обходятся.

Петербургские специалисты разработали более простой и эффективный способ. Их робот может самостоятельно перемещаться по корпусу судна – как под водой, так и по надводной части. При этом производить очистку можно прямо на рейде, без захода в док.

Несмотря на наличие аналогов подобных аппаратов, способ, который предложили в СПбГМТУ, является более совершенным и экологичным [20].

Беспилотные морские суда

Создание морских грузовых судов, использующих искусственный интеллект для управления судном и судовождения, позволяет существенно сократить экипаж, но тем не менее сохранит на борту присутствие человека. Новые интеллектуальные технологии будут способствовать исключению большинства происшествий на море, зависящих от человеческого фактора, при этом наиболее опасные операции на борту будут выполняться роботами.

14 мая 2019 г. небольшое (длиной 12 м) судно Maxlimer компании SEA-KIT International Ltd совершило безэкипажный 22-часовой рейс по Северному морю на загруженном морском маршруте из порта Мерсеи (Великобритания) в порт Остенде (Бельгия) с символическим грузом в 5 кг устриц – это лишь небольшая часть от максимальной полезной нагрузки. Всего же «Maxlimer» способен принять до 2,5 тонн груза.

Теплоход Maxlimer был спроектирован и построен Hushcraft Ltd в Толлсбери (Эссекс, Великобритания) с целью демонстрации

возможностей автономной навигации при помощи GPS и спутниковой связи (рис. 12).



Рис. 12. Безэкипажное судно Maxlimer

Во время плавания система контроля позволяла оператору удаленно получать доступ к видеоматериалам и тепловизионным изображениям, и в реальном времени следить за обстановкой на беспилотном судне.

По завершению рейса, судно вышло в обратный путь с бельгийским пивом. По результатам тестирования беспилотное судно типа Maxlimer может быть адаптировано к ряду задач, включая гидрографические исследования, экологические миссии, морскую безопасность и др. [21].

Также в Великобритании ведется работа над проектом беспилотного судна MUNIN (Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks – морская беспилотная навигация через сети интеллектуальных систем). Дизайн судов разработан компанией «Rolls-Royce» в рамках европейского проекта, посвященного развитию автономного судоходства. В данный проект вкладывают деньги еще семь европейских государств и планируется, что уже через двадцать лет беспилотные 200-метровые суда будут бороздить мировой океан без участия человека (рис. 13).



Рис. 13. Проект беспилотного грузового судна с дистанционным управлением

Предполагается, что выгода будет состоять не только в экономии топлива, но и в уменьшении шанса на ошибку при «человеческом факторе», потому что более 75% аварий на море случается именно по этой причине.

По прогнозам производителей беспилотных судов к 2030-м годам морское законодательство и технологии должны быть готовы к появлению морских беспилотных судов [22].

Однако, по мнению специалистов, пройдет немало времени прежде, чем испытания подтвердят надежность безэкипажных морских судов. Тем более, что в настоящее время любое судно, находящееся в открытом море вне своих территориальных вод без экипажа на борту, считается бесхозным, а на урегулирование международного права в рамках судоходства со всеми странами мира может уйти не один десяток лет.

Заключение

Основными направлениями поиска новых технологий в сфере развития морского транспорта является использование новых видов топлива, наносящего минимальный вред экологии (СПГ, биотоплива, возобновляемой энергии ветра, солнца и т.д.), а также создание экономичного и роботизированного беспилотного транспорта.

Появление новых современных морских технологий – прогрессивный фактор в улучшении экологии на планете, облегчении труда и сохранении здоровья экипажа и сотрудников, обслуживающих морские суда на берегу. Вместе с тем появление судов на более экологически чистом топливе, роботизация судовых рабочих операций, внедрение на морских коммуникациях беспилотных судов и т.п. потребует дополнительного времени на создание новой навигационной и портовой инфраструктуры для их эксплуатации – новые терминалы, диспетчерские центры, инженерные и IT-кадры, правового обеспечения и т.д.

Прогнозируется, что в будущем морские суда должны стать крупнее и получить другие конструктивные особенности, чтобы вмещать резервуары для СПГ, водорода, метанола или другого альтернативного топлива.

Также предполагается, что стратегическая цель – существенное снижение выбросов углекислого газа морскими судами более чем на 20% – будет достигнута уже к 2030 году.

Литература

1. Малыгин И.Г., Гурлев И.В. Мировые тенденции развития транспорта. Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2023. № 5-6 (108-109). С. 32-36.
2. Гурлев И.В., Маслобоев А.В., Малыгин И.Г. Северный морской транспортный коридор как угроза экологической безопасности Арктики. Труды ИСА РАН. 2022. Том 72. № 4. С. 82-95.
3. Конференция участников международной конвенции по предупреждению загрязнения окружающей среды с судов (МАРПОЛ 73/78). Приложение VI. Инструкция по предотвращению загрязнения воздуха с судов.
4. Первый в мире гибридный лайнер спущен на воду в Норвегии. 10.07.2019. URL: <https://eenergy.media/news/11030> (дата обращения: 18.01.2024).
5. На верфях России решили создать работающие на метаноле суда. 03.09.2021. URL: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/613243999a79473e50a94af0> (дата обращения: 23.01.2024).
6. Viking Cruises получила первое судно на водородном топливе. 25.11.2022. URL: <https://dzen.ru/a/Y4CCsyfyVGAOyBQ3> (дата обращения: 24.01.2024).

7. «Мы открываем новую страницу в истории нашего судоходства», – началось строительство первого в России судна на водородном топливе. 28.02.2023. URL: <https://www.ixbt.com/news/2023/02/28/my-otkryvaem-novuyu-stranicu-v-istorii-nashego-sudohodstva--nachalos-stroitelstvo-pervogo-v-rossii-sudna-na-vodorodnom.html> (дата обращения: 21.01.2024).
8. В России успешно испытали первое водородное судно. <https://www.ixbt.com/news/2023/10/09/v-rossii-uspeshno-ispytali-pervoe-vodorodnoe-sudno.html> (дата обращения 06.09. 2023).
9. Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации. Указ Президента РФ от 26 октября 2023 г. № 812.
10. Малыгин И.Г., Королева Л.А. Применение системного подхода для сбалансированной экологической оценки судов на водородном топливе. Морские интеллектуальные технологии, № 4 (62). Ч.1. 2023. С. 189-196.
11. Полярный гигант. Первый в мире арктический газовоз. 26 декабря 2019. URL: <https://dzen.ru/a/XgOIwk4FdwCxnHyc> (дата обращения: 22.01.2024).
12. Хорошев В.Г., Попов Л.Н., Гатин Р.И. Перспективы использования альтернативных видов топлива в судовых энергетических установках. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. № 4 (390). С. 194-202.
13. Растительное масло – новый вид топлива? 20.09.2018. URL: http://npsm.pf.ru/news/lent/2018-09-20/rastitelnoe_maslo_novyy_vid_topliva_16892/ (дата обращения: 20.01.2024).
14. Исследование ExxonMobil по внедрению биотоплива из водорослей к 2025 году. 08.03.2018. URL: <https://www.yahoo.com/entertainment/exxonmobil-apos-study-introduce-algae-220310824.html> (дата обращения: 03.01.2024).
15. Первый катамаран на солнечной энергии пошел в серийное производство. 28.05.2020. URL: <https://eenergy.media/news/15088> (дата обращения: 19.01.2024).
16. Швеция построит трансатлантический парусник. 13.09.2020. URL: <https://eenergy.media/news/16208> (дата обращения: 19.01.2024).
17. Отчет по экологической безопасности ФГУП «Атомфлот» за 2022 год. URL: http://www.rosatomflot.ru/img/all/1_eco_otchet_2022_.pdf (дата обращения: 20.01.2024).
18. Корабельный робот-пожарный SAFFiR. 05.02.2015. URL: <https://habr.com/ru/articles/376211/> (дата обращения: 22.01.2024).
19. HullBUG разгоняет корабль на 10 км/ч. 07.11.2018. URL: <https://www.tw-motor.com/info/hullbug-speeds-up-the-ship-by-10-km-h-30420758.html> (дата обращения: 22.01.2024).
20. В Петербурге создали робота для экологичной очистки судов от водорослей. 21.11.2023. URL: <https://www.dp.ru/a/2023/11/21/v-peterburge-sozdali-robota> (дата обращения: 28.01.2024).
21. Первый в мире автономный рейс. 14.05.2019. URL: <http://news.crewmarket.net/2019/05/pervyy-v-mire-autonomnyj-rejs.html> (дата обращения: 24.01.2024).
22. Тарасов А. Проект MUNIN сделает беспилотные танкеры реальностью. 24.09.2014. URL: <https://www.techcult.ru/technology/1886-proekt-munin> (дата обращения: 27.01.2024).

References

1. Malygin I.G., Gurlev I.V. Mirovyye tendentsii razvitiya transporta [Global trends in transport development]. Transport Rossiyskoy Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike. 2023. № 5-6 (108-109). pp. 32-36.
2. Gurlev I.V., Masloboev A.V., Malygin I.G. Severnyy morskoy transportnyy koridor kak ugroza ekologicheskoy bezopasnosti Arktiki [The Northern Sea Transport Corridor as a threat to the environmental safety of the Arctic]. Trudy ISA RAN. 2022. Tom 72. № 4. pp. 82-95.
3. Konferentsiya uchastnikov mezhdunarodnoy konventsii po preduprezhdeniyu zagryazneniya okruzhayushchey sredy s sudov (MARPOL 73/78). Prilozheniye VI. Instruksiya po predotvrashcheniyu zagryazneniya vozdukhа s sudov [Conference of the Parties to the International Convention on the Prevention of Environmental Pollution from Ships (MARPOL 73/78). Annex VI. Instructions for the prevention of air pollution from ships].
4. Pervyy v mire gibridnyy layner spushchen na vodu v Norvegii [The world's first hybrid liner launched in Norway]. 10.07.2019. URL: <https://eenergy.media/news/11030> (дата обрashcheniya: 18.01.2024).
5. Na verfyakh Rossii reshili sozdat' rabotayushchiye na metanole suda [Russian shipyards decided to create methanol-powered vessels]. 03.09.2021. URL: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/613243999a79473e50a94af0> (дата обрashcheniya: 23.01.2024).
6. Viking Cruises poluchila pervoye sudno na vodorodnom toplive [Viking Cruises received the first hydrogen-fueled vessel]. 25.11.2022. URL: <https://dzen.ru/a/Y4CCypfyVGAOyBQ3> (дата обрashcheniya: 24.01.2024).
7. «My otkryvayem novuyu stranicu v istorii nashego sudohodstva», – nachalos' stroitel'stvo pervogo v Rossii sudna na vodorodnom toplive ["We are opening a new page in the history of our shipping," construction of Russia's first hydrogen-fueled vessel has begun]. 28.02.2023. URL: <https://www.ixbt.com/news/2023/02/28/my-otkryvaem-novuyu-stranicu-v-istorii-nashego-sudohodstva--nachalos-stroitelstvo-pervogo-v-rossii-sudna-na-vodorodnom.html> (дата обрashcheniya: 21.01.2024).
8. V Rossii uspeshno ispytali pervoye vodorodnoye sudno [The first hydrogen vessel has been successfully tested in Russia]. URL: <https://www.ixbt.com/news/2023/10/09/v-rossii-uspeshno-ispytali-pervoe-vodorodnoe-sudno.html> (дата обрashcheniya 06.09. 2023).
9. Ob utverzhdenii Klimaticheskoy doktriny Rossiyskoy Federatsii [On the approval of the Climate Doctrine of the Russian Federation]. Ukaz Prezidenta RF ot 26.10.2023 g. № 812.
10. Malygin I.G., Koroleva L.A. Primeneniye sistemnogo podkhoda dlya sbalansirovannoy ekologicheskoy otsenki sudov na vodorodnom toplive [Application of a systematic approach for a balanced environmental assessment of hydrogen-fueled vessels]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii, № 4 (62). CH.1. 2023. pp. 189-196.

11. Polyarnyy gigant. Pervyy v mire arkticheskiy gazovoz [The polar giant. The world's first Arctic gas carrier]. 26 dekabrya 2019. URL: <https://dzen.ru/a/XgOlwk4FdwCxnHYc> (data obrashcheniya: 22.01.2024).
12. Khoroshev V.G., Popov L.N., Gatin R.I. Perspektivy ispol'zovaniya al'ternativnykh vidov topliva v sudovykh energeticheskikh ustanovkakh [Prospects for the use of alternative fuels in marine power plants]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra. 2019. № 4 (390). pp. 194-202.
13. Rastitel'noye maslo – novyy vid topliva? [Is vegetable oil a new type of fuel?] 20.09.2018. URL: http://rpsm.rf/ru/news/lent/2018-09-20/rastitelnoe_maslo_novyj_vid_topliva__16892/ (data obrashcheniya: 20.01.2024).
14. Issledovaniye ExxonMobil po vnedreniyu biotopliva iz vodorosley k 2025 godu [ExxonMobil study on the introduction of biofuels from algae by 2025]. 08.03.2018. URL: <https://www.yahoo.com/entertainment/exxonmobil-apos-study-introduce-algae-220310824.html> (data obrashcheniya: 03.01.2024).
15. Pervyy katamaran na solnechnoy energii poshel v seriynoye proizvodstvo [The first solar-powered catamaran went into mass production]. 28.05.2020. URL: <https://eenergy.media/news/15088> (data obrashcheniya: 19.01.2024).
16. Shvetsiya postroit transatlanticheskiy parusnik [Sweden will build a transatlantic sailboat]. 13.09.2020. URL: <https://eenergy.media/news/16208> (data obrashcheniya: 19.01.2024).
17. Otchet po ekologicheskoy bezopasnosti FGUP "Atomflot" za 2022 god [The report on environmental safety of FSUE Atomflot for 2022]. URL: http://www.rosatomflot.ru/img/all/1_eco_otchet_2022_.pdf (data obrashcheniya: 24.01.2024).
18. Korabel'nyy robot-pozharnyy SAFFiR [Shipboard firefighter robot SAFFiR]. 05.02.2015. URL: <https://habr.com/ru/articles/376211/> (data obrashcheniya: 22.01.2024).
19. HullBUG razgonyayet korabl' na 10 km/h [HullBUG accelerates the ship by 10 km/h]. 07.11.2018. URL: <https://www.tw-motor.com/info/hullbug-speeds-up-the-ship-by-10-km-h-30420758.html> (data obrashcheniya: 22.01.2024).
20. V Peterburge sozdali robota dlya ekologichnoy oчитки sudov ot vodorosley [In St. Petersburg, a robot was created for environmentally friendly cleaning of ships from algae]. 21.11.2023. URL: <https://www.dp.ru/a/2023/11/21/v-peterburge-sozdali-robota> (data obrashcheniya: 28.01.2024).
21. Pervyy v mire avtonomnyy reys [The world's first autonomous flight]. 14.05.2019. URL: <http://news.crewmarket.net/2019/05/pervyj-v-mire-avtonomnyj-rejs.html> (data obrashcheniya: 24.01.2024).
22. Tarasov A. Proyekt MUNIN sdelayet bespilotnyye tankery real'nost'yu [The MUNIN project will make unmanned tankers a reality]. 24.09.2014. URL: <https://www.techcult.ru/technology/1886-proekt-munin> (data obrashcheniya: 27.01.2024).

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

Малыгин Игорь Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, директор Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; e-mail: malygin_com@mail.ru

Igor G. Malygin, professor, Dr. Sci. (Eng), CEO of the Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: malygin_com@mail.ru

Гурлев Игорь Валентинович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; e-mail: gurleff@mail.ru

Igor V. Gurlev, senior researcher, 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: gurleff@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 04.02.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 11.02.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 22.02.2024.

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS

Научная статья

УДК 629.5.024.3:532.5.013

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.005>

Разработка новой формы носовой оконечности судна для повышения безопасности мореплавания в штормовых условиях

Бураковский Е.П.¹ e_burakovsky@mail.ru, Бураковский П.Е.² paul_b@mail.ru,
Веревошкин А.В.¹ aaa-andrey@mail.ru, Юсуп В.М.¹ v-y48@yandex.ru

¹ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала Н.Г. Кузнецова» (филиал в г. Калининграде)

²Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»

Аннотация. Анализ аварийной статистики по мировому флоту показывает, что одной из основных причин гибели морских судов являются неблагоприятные погодные условия, связанные с возникновением значительных волновых нагрузок на их корпуса, что сопровождается потерей остойчивости или разрушением корпусных конструкций. Исследование, проведенное с использованием методов вычислительной гидродинамики, показало, что на носовой оконечности традиционной формы при её зарывании в волну развиваются значительные гидродинамические силы и моменты, что способствует гибели судов. Поэтому авторами была предложена новая форма носовой оконечности, позволяющая повысить безопасность судна при наличии зарываемости в волну в условиях шторма. Исследование гидродинамических характеристик новой формы носовой оконечности выполнялось с использованием метода SPH. Проведённый анализ показал, что при зарывании в волну носовой оконечности предлагаемой конструкции практически во всем диапазоне курсовых углов и углов крена на ней генерируется восстанавливающий момент, способствующий предотвращению опрокидывания судна. Отмечено, что при движении судна курсом носом на волну величина боковой силы, стремящейся развернуть судно лагом к волне, в предложенной конструкции в пять раз меньше, чем в традиционной. Исследовано влияние геометрических характеристик бульбовой наделки (длины и диаметра) в предлагаемой конструкции на величину гидродинамических сил и моментов. Использование предложенных технических решений позволит повысить безопасность мореплавания в условиях шторма.

Ключевые слова: штормовые условия, зарывание носовой оконечности, гидродинамические нагрузки, новая форма носовой оконечности, восстанавливающий момент, SPH, безопасность мореплавания.

Для цитирования: Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Веревошкин А.В., Юсуп В.М. Разработка новой формы носовой оконечности судна для повышения безопасности мореплавания в штормовых условиях. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 50—58. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.005

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.005>

Development of a new shape of the bow end of the vessel to improve navigation safety in stormy conditions

Evgeny P. Burakovskiy¹ e_burakovsky@mail.ru, Pavel E. Burakovskiy² paul_b@mail.ru,
Andrey V. Verevoshkin¹ aaa-andrey@mail.ru, Vyacheslav M. Yusup¹ v-y48@yandex.ru

¹Admiral N. G. Kuznetsov Naval Academy (Branch Kaliningrad), Kaliningrad, Russian Federation

²Baltic Fishing Fleet State Academy, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. Analysis of accident statistics for the world fleet shows that one of the main causes of loss of seagoing vessels is unfavorable weather conditions associated with the occurrence of significant wave loads on their hulls, which is accompanied by loss of stability or destruction of hull structures. A study conducted using computational fluid dynamics methods showed that at the bow end of a traditional shape, when it is buried in a wave, significant hydrodynamic forces and moments develop, which contributes to the loss of ships. Therefore, the authors proposed a new shape of the bow, which makes it possible to increase the safety of the vessel in the presence of burrowing into waves in storm conditions. The study of the hydrodynamic characteristics of the new shape of the bow end was carried out using the SPH method. The analysis showed that when the bow end of the proposed structure is buried in a wave in almost the entire range of heading angles and roll angles, a righting moment is generated on it, which helps prevent the vessel from capsizing. It is noted that when the vessel moves with its bow heading towards the wave, the magnitude of the lateral force tending to turn the vessel with its lag towards the wave is five times less in the proposed design than in the traditional one. The influence of the geometric characteristics of the bulb fitting (length and diameter) in the proposed design on the magnitude of hydrodynamic forces and moments was studied. The use of the proposed technical solutions will improve the safety of navigation in storm conditions.

Key words: storm conditions, burying of the bow end, hydrodynamic loads, new shape of the bow end, righting moment, SPH, navigation safety.

For citation: Evgeny P. Burakovskiy, Pavel E. Burakovskiy, Andrey V. Verevochkin, Vyacheslav M. Yusyp Development of a new shape of the bow end of the vessel to improve navigation safety in stormy conditions. Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 50—58. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.005

Введение

Анализ аварий на судах мирового флота показывает, что одной из основных причин гибели морских судов являются неблагоприятные погодные условия, связанные с возникновением значительных волновых нагрузок на их корпуса [1, 2, 3]. Под действием этих нагрузок нередко происходит либо опрокидывание судна, либо разрушение корпуса [4, 5, 6].

Совершенствованию формы обводов в носовой оконечности судов с целью повышения их мореходных качеств, стабилизации судов на волнении и обеспечения безопасности мореплавания посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных учёных [7, 8, 9, 10, 11].

В работах [12, 13] предложены конструкции, повышающие штормовую мореходность судов за счёт особой формы обводов в поясе переменных ватерлиний, а также путём использования ряда инженерно-технических и конструктивных элементов в устройстве форштевня, скуловых обводов и надводной части носовой оконечности корпуса. Также известны такие решения, как Axe-Bow, Ax-Bow, LEADGE-Bow, SP-Bow, Beak-Bow, X-Bow, носовая оконечность, разработанная STX OSV Design [11, 14, 15, 16, 17]. Разработаны формы корпуса, характеризующиеся завалом борта в носовой оконечности и обратным наклоном форштевня [6, 18], позволяющие носу судна прорезать набегающие волны, что улучшает штормовую мореходность судна.

Ввиду значительного количества известных архитектурно-конструктивных решений не представляется возможным дать даже краткую их характеристику в рамках настоящей статьи, однако такой анализ проводился рядом учёных и с его результатами можно ознакомиться, например, в [6, 8].

При этом надо заметить, что безопасность должна определяться поведением судна в экстремальных ситуациях, одной из которых является зарывание носом в волну при развитой качке в условиях шторма. В этом случае на носовую оконечность судна действует система сил и моментов, способных развернуть судно лагом к волне или даже опрокинуть его. Схема сил, действующих на носовую оконечность в условиях её зарывания в волну, рассмотрена в работах [5, 19, 20].

Принципиально важно, что для того, чтобы исключить или ограничить действие этих сил и моментов необходимо, чтобы носовая оконечность основного корпуса имела осевую симметрию относительно продольной оси судна. Этими свойствами обладает предлагаемая форма носовой оконечности. Известные в настоящее время корпусные конструкции, представленные, например, в [11, 14, 15, 16, 17], не обладают этим свойством, а, следовательно, и теми положительными качествами, которые представлены ниже в настоящей статье.

В работах авторов [5, 21, 22, 26] показано, что на носовую оконечность традиционной конструкции при зарывании в волну развиваются кренящие моменты, под действием которых судно может опрокинуться.

1. Методика проведения вычислительного эксперимента

Для определения гидродинамических характеристик носовой оконечности были проведены её испытания с использованием технологии SPH [21, 22, 23, 24]. Данный метод относится к бессеточным, при его реализации жидкость моделируется путем деления на дискретные элементы (частицы). Для описания движения жидкости используются уравнения Навье-Стокса, жидкость считается вязкой и слабо сжимаемой.

В рамках реализации данного метода осуществляется аппроксимация поля набором частиц, а все необходимые физические характеристики $F(r)$ определяются из условия

$$F(r) = \int F(r') W(r - r', h) dr', \quad (1)$$

где h – радиус сглаживания;

$W(r - r', h)$ – сглаживающая функция.

В дискретной форме это уравнение имеет вид (индексы a и b относятся к отдельным частицам):

$$F(r_a) \approx \sum_b F(r_b) W(r_a - r_b, h) \Delta v_b, \quad (2)$$

где Δv_b – объём соседней частицы.

Более подробно с особенностями реализации данного метода можно ознакомиться в [23, 24].

При этом осуществлялось вертикальное погружение модели носовой оконечности (в масштабе 1:100) на различные глубины в поток жидкости, движущийся со скоростью u , имитирующий зарывание носа судна в воду (рис. 1, рис. 2 и рис. 3). Результирующая скорость обтекания носовой оконечности может быть определена с использованием методики, представленной в [20] и основанной на моделировании продольной качки судна в условиях зарывания его носовой оконечности во встречную волну. В процессе вычислительного эксперимента данная скорость варьировалась, представленные результаты получены при скорости обтекания модели $u=0,5$ м/с. Для построения модели носовой оконечности использовалось программное обеспечение для трёхмерного NURBS-моделирования Rhinoceros 3D.

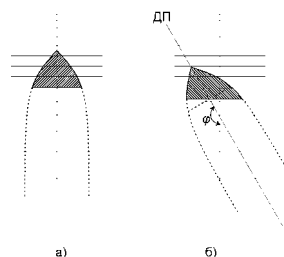


Рис. 1. Схема зарывания палубы при движении судна: а) – носом на волну; б) – косым курсом

В процессе моделирования использовались три системы координат (рис. 2). Система координат $Oxuz$ жестко связана с судном, ось Ox направлена вдоль судна, Oy – на правый борт, Oz – от днища к палубе. Начало отсчета O располагается в диаметральной плоскости судна на расстоянии половины высоты борта от основной плоскости на миделе судна.

Система координат $O'x'y'z'$ аналогична предыдущей и отличается от нее тем, что начало координат смещено на $1/6 \cdot L$ в сторону носовой оконечности, где L – длина судна. Система координат $O'x'y'z''$ совпадает со второй системой координат при отсутствии крена судна, в противном случае угол между осями $O'y'$ и $O'y''$, а также $O'z'$ и $O'z''$ составляет θ .

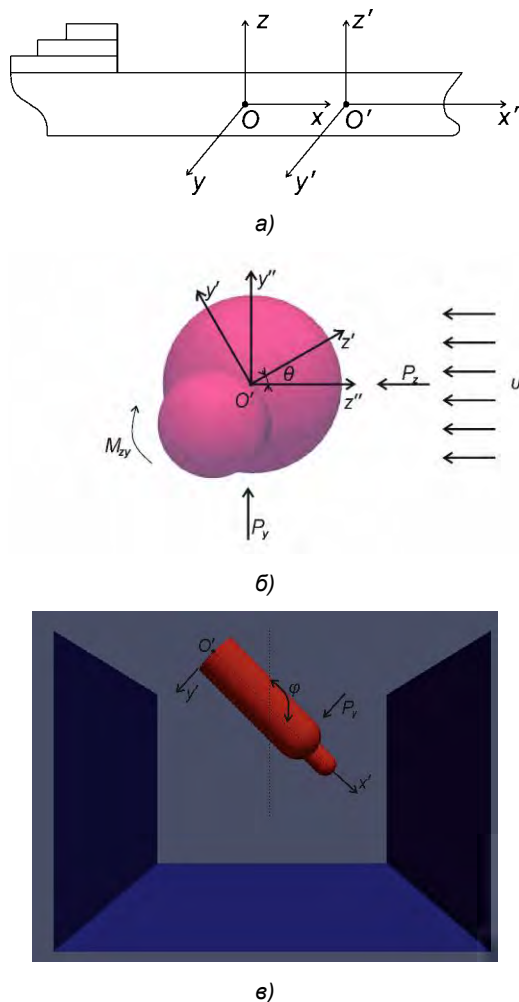


Рис. 2. Системы координат и направление действия гидродинамических сил: а) – системы координат; б) – вид снизу на установку при $\varphi=0^\circ$; в) – вид спереди

В процессе эксперимента реализовывалась возможность создания крена судна θ (поворот вокруг продольной оси модели) и изменения курсового угла движения судна φ . Модель носовой оконечности в процессе испытаний представлена на рис. 3. В ходе проведения испытаний при фиксированных углах θ и φ определялись усилия, действующие на модель в направлении ее обтекания (вдоль оси $O'z''$) P_z , усилия, действующие в перпендикулярном направлении (вдоль оси $O'y''$) P_y и гидродинамический момент M_{zy} . Для удобства записи в обозначении силы знак «'» опускается, за положительное направление действия силы P_z принято направление, противоположное направлению оси $O'z''$.

Для удобства анализа результатов расчета все искомые величины представлены в безразмерном виде согласно (3) – (5):

$$\bar{P}_z = \frac{P_z}{\Delta}, \quad (3)$$

$$\bar{P}_y = \frac{P_y}{\Delta}, \quad (4)$$

$$\bar{m}_{zy} = \frac{M_{zy}}{M_{\max M}}, \quad (5)$$

где P_z – сила, действующая на модель в направлении обтекания при ее развороте на угол θ ;

P_y – сила, действующая на модель в направлении, перпендикулярном направлению обтекания, при развороте модели на угол θ ;

Δ – весовое водоизмещение модели;

M_{zy} – гидродинамический момент;

$M_{\max M}$ – восстанавливающий момент,

определяемый согласно [21, 25].

Правилами Регистра [25] в числе общих требований к остойчивости морских судов установлен ряд условий, которым должна отвечать диаграмма статической остойчивости. В частности, нормируется площадь под положительной частью диаграммы и максимальное плечо диаграммы статической остойчивости $I_{\max}$ согласно пункту 2.2.1 [25]. При этом плечо статической остойчивости $I_{\max}$,

можно определить из условия

$$\frac{M_{\max}}{\Delta_H} = I_{\max}, \quad (6)$$

где Δ_H – весовое водоизмещение судна;

$M_{\max}$ – восстанавливающий момент, соответствующий максимуму диаграммы статической остойчивости судна.

С учетом масштаба модели максимальный восстанавливающий момент для нее $M_{\max M}$ при удовлетворении требований [25] составит

$$M_{\max M} = I_{\max M} \cdot \Delta, \quad (7)$$

где $I_{\max M}$ – максимальное плечо диаграммы статической остойчивости модели при удовлетворении требований [25];

Δ – весовое водоизмещение модели.

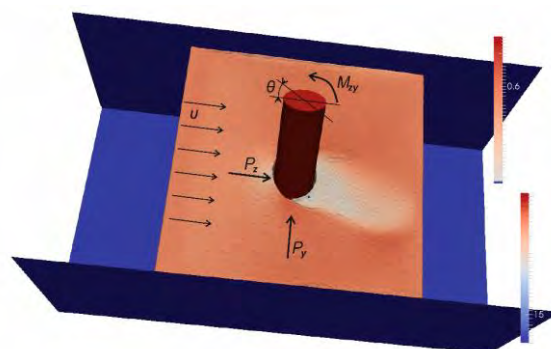


Рис. 3. Носовая оконечность в процессе испытаний

В процессе проведения исследования варьировалась как длина бульбовой наделки, так и её диаметр. При этом использовались три варианта исполнения носовой оконечности, для которых диаметр бульбовой наделки составлял $0,5D$, $0,375D$ и $0,25D$, где D – диаметр основной части корпуса.

2. Взаимодействие носовой оконечности традиционной конструкции с волной в условиях зарываемости

Результаты моделирования динамики взаимодействия носовой оконечности традиционной конструкции с волной в условиях зарываемости представлены в безразмерном виде на рис. 4, где θ – угол крена судна (поворот модели вокруг её продольной оси); φ – курсовой угол движения судна.

Приведённые на рис. 4 зависимости получены при зарывании носовой оконечности в воду на длине $L/4$, где L – длина корпуса судна. Результаты исследования гидродинамических характеристик носовой оконечности традиционной конструкции при её зарывании в волну более подробно представлены в [21, 22, 26].

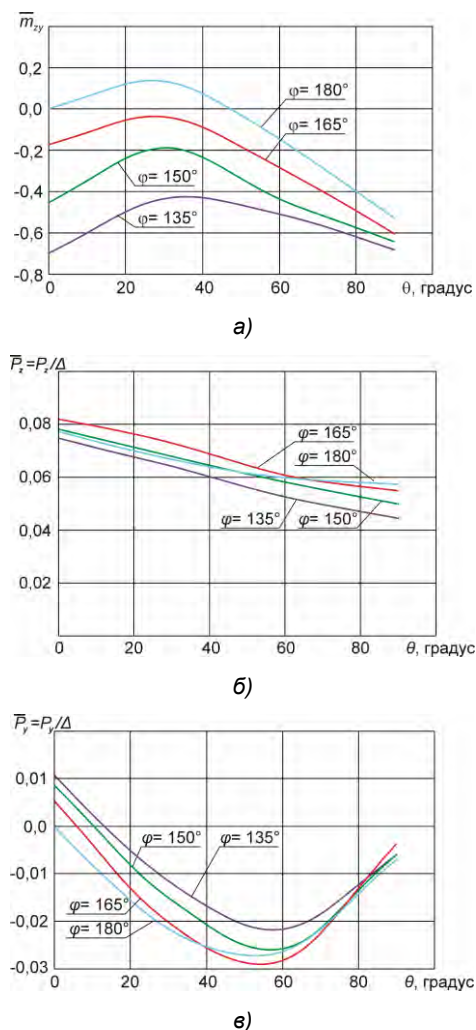


Рис. 4. Результаты испытаний носовой оконечности с традиционной формой с фальшбортом при угле развала $\beta = 45^\circ$: а) – гидродинамический момент; б) – сила, действующая в направлении обтекания; в) – боковая сила

Видно, что для традиционной формы конструкции носовой оконечности практически во всей области момент является кренящим, что негативно сказывается на безопасности судна. Кроме того, на носовую оконечность с традиционной конструкцией действуют значительные боковые усилия (рис. 4, в), стремящиеся развернуть судно лагом к волне с

последующим его опрокидыванием. Вертикальные же усилия P_z , действующие на носовую оконечность (рис. 4, б), резко сокращают величину поперечной метацентрической высоты h_0 вплоть до её обнуления [5, 19, 20].

В таких условиях, с учётом смещения точки приложения равнодействующей гидродинамических сил от диаметральной плоскости судна, даже незначительное усилие P_z создаёт опасный кренящий момент, способный опрокинуть судно.

3. Новая форма носовой оконечности

Для повышения безопасности судов в штормовых условиях авторами была предложена новая форма носовой оконечности, способствующая уменьшению гидродинамических сил и моментов при зарывании в волну [27]. Разработанная конструкция представлена на рис. 5, где приняты следующие обозначения: 1 – основная часть корпуса судна; 2 – бульбовая наделка; 3 – переход от основной части корпуса к бульбовой наделке; D – диаметр основной части корпуса; d – диаметр бульбовой наделки; l – длина бульбовой наделки.

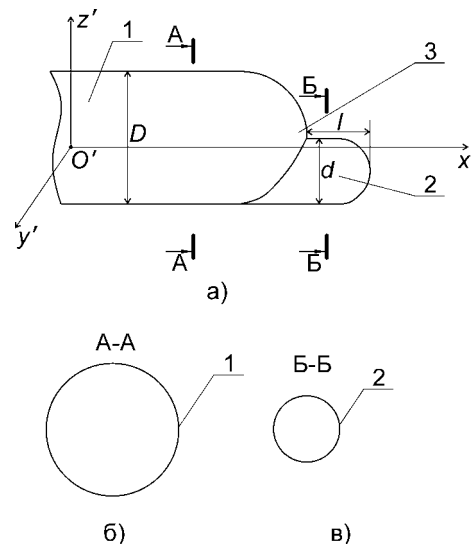


Рис. 5. Новая форма носовой оконечности судна: а) – общий вид; б) – поперечное сечение основной части корпуса; в) – поперечное сечение бульбовой наделки

В предложенной конструкции как основная часть корпуса, так и бульбовая наделка имеют форму прямых круговых цилиндров. При этом они устанавливаются таким образом, чтобы нижняя часть бульба лежала в основной плоскости судна. Для такой конструкции при зарывании в волну гидродинамические нагрузки существенно уменьшатся по сравнению с традиционной конструкцией (в случае равенства площадей проекций на плоскость, перпендикулярную направлению обтекания, для предлагаемой и традиционной форм носовых оконечностей) за счет обтекаемой формы обводов. При этом форма основной части носовой оконечности в виде прямого кругового цилиндра позволяет избежать возникновения гидродинамических моментов, стремящихся опрокинуть судно, при набегании на неё потока жидкости в случае зарывания в волну, так как практически отсутствует смещение равнодействующей сил давления на цилиндре.

Кроме того, при обтекании потоком жидкости носовой оконечности предлагаемой конструкции несколько уменьшается составляющая гидродинамической силы, стремящая развернуть судно лагом к волне. Это обусловлено симметричной формой обводов носовой оконечности, что отличает её от традиционной конструкции.

Кроме того, в предлагаемом техническом решении при обтекании бульбовой наделки в вертикальном направлении возникает гидродинамическая сила, которая при наличии крена судна будет стремиться повернуть судно относительно продольной оси в направлении уменьшения угла крена. Это обстоятельство всегда будет способствовать возникновению восстанавливающего момента, улучшающего остойчивость судна с носовой оконечностью предлагаемой конструкции в условиях её зарывания в волну.

4. Результаты и их обсуждение

Типовые результаты эксперимента приведены на рис. 6-10, представленные зависимости получены при погружении носовой оконечности в воду на глубину $L/4$, где L – длина корпуса судна.

На рис. 6 представлены нормальные силы давления на палубу судна в зависимости от курсового угла и крена. Видно, что при ходе курсом $\varphi = 180^\circ$ (носом на волну) уровень давления находится ниже величины $\bar{P}_z = 0,08$, т.е. ниже традиционно используемой величины так называемого малого груза. На всех остальных курсовых углах и углах крена уровень давления падает более чем в два раза. Следует отметить, что в предложенной конструкции носовой оконечности равнодействующая сил давления приложена строго в диаметральной плоскости и не создаёт дополнительного кренящего момента, в отличие от оконечности традиционной формы [5, 21, 22].

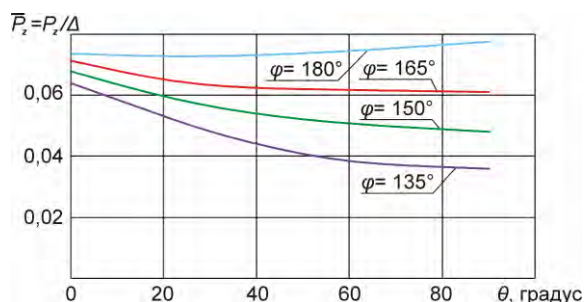


Рис. 6. Зависимость гидродинамической силы, действующей в направлении обтекания, от угла крена при вариации курсового угла

На рис. 7 представлены графики бокового давления на носовую оконечность в зависимости от курсового угла и крена. Максимальный уровень давления зафиксирован при курсовом угле $\varphi = 135^\circ$, при этом он почти в два раза ниже, чем для судов с традиционной формой оконечности.

При движении носом на волну ($\varphi = 180^\circ$) максимальный уровень бокового давления составляет $\bar{P}_y = 0,005$, при этом для носовой оконечности традиционной конструкции $\bar{P}_y = 0,027$, что позволяет судну с предлагаемой конструкцией более устойчиво двигаться по заданному курсу.

На рис. 8 представлены графики гидродинамических моментов также в зависимости от курсового угла и крена. Как уже отмечалось выше, специфической особенностью предлагаемой конструкции является то обстоятельство, что при малейшем крене корпуса он за счёт гидродинамических сил давления, индуцируемых на бульбовой наделке, сразу возвращается в первоначальное положение.

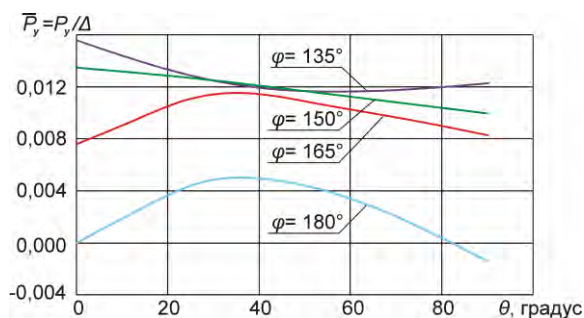


Рис. 7. Зависимость боковой силы от угла крена при вариации курсового угла

Поэтому почти вся область графиков находится в области восстанавливающих моментов, за исключением незначительной области при движении судна косым курсом. Эти отрицательные кренящие моменты вызваны несимметричным давлением на основной корпус в зоне выхода корпуса из воды. Однако по мере увеличения крена растёт и восстанавливающий момент, создаваемый гидродинамическими силами давления, возникающими на бульбе. Чем больше угол крена, тем больше восстанавливающий момент, который в конечном счёте нивелирует кренящий.

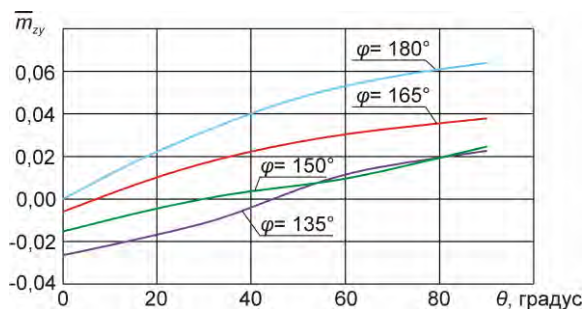


Рис. 8. Зависимость гидродинамического момента от угла крена при вариации курсового угла

Величину гидродинамических сил давления на бульбе можно повысить, увеличив размеры бульбообразной наделки, а именно её длину и диаметр. Эти закономерности представлены на рис. 9 и рис. 10. Так, на рис. 9 представлены закономерности изменения восстанавливающего момента, создаваемого бульбообразной наделкой, за счёт вариации её длины. Так, например, при угле крена $\theta = 60^\circ$ восстанавливающий момент, создаваемый бульбовой наделкой длиной $l = L/24$, составляет $\bar{m}_{zy} = 0,2$, а при длине $l = 3 \cdot L/24$, т.е. при увеличении длины в три раза, достигается восстанавливающий момент $\bar{m}_{zy} \approx 0,85$, т.е. он увеличивается более, чем в четыре раза.

Ясно, что слишком длинная бульбовая наделка не всегда может быть реализована в силу ряда

ограничений. В этом случае можно, если требуется увеличить восстанавливающий момент, варьировать диаметром бульбовой наделки. Закономерности изменения восстанавливающих моментов в зависимости от диаметра бульба представлены на рис. 10.

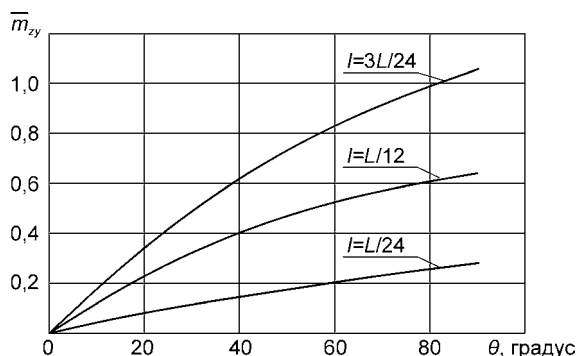


Рис. 9. Зависимость восстанавливающего момента от длины бульбовой наделки при курсовом угле $\varphi = 180^\circ$

Видно, что в этом случае восстанавливающие моменты растут не так быстро. Так, при $\theta = 60^\circ$ и диаметре конструкции бульба $d = 0,25D$ (где D — диаметр основной части корпуса в носовой оконечности) восстанавливающий момент составляет $\bar{m}_{zy} = 0,4$, а при увеличении диаметра в два раза, т.е. при $d = 0,5D$, восстанавливающий момент увеличивается до $\bar{m}_{zy} = 0,52$, т.е. всего на 30%.

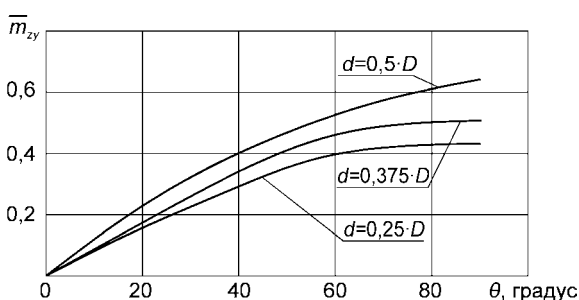


Рис. 10. Зависимость восстанавливающего момента от диаметра бульбовой наделки при курсовом угле $\varphi = 180^\circ$

С учётом того, что предлагаемая конструкция носовой оконечности характеризуется формой обводов, существенно отличающейся от традиционно применяемых, было проведено исследование влияния предлагаемых конструктивных изменений на ходкость судна. Расчёт буксировочного сопротивления выполнялся с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent для танкера длиной 168 м с традиционной (кривая 1) и предлагаемой (кривая 2) формой носовой оконечности (рис. 11, где R — буксировочное сопротивление, v — скорость).

Анализ показал, что в случае реализации предложенных конструктивных решений при скоростях до 13 узлов буксировочное сопротивление отличается не более, чем на 2%. С увеличением скорости наблюдается некоторый рост буксировочного сопротивления в предлагаемой конструкции по сравнению с традиционной и при скорости 22 узла превышение составляет 21%.

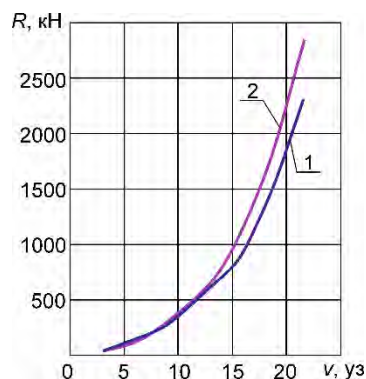


Рис. 11. Буксировочное сопротивление судна с традиционной (кривая 1) и предлагаемой (кривая 2) формой носовой оконечности

Следует заметить, что для внедрения данной конструкции в практику судостроения необходимо рассмотреть вопросы качки, вибрации и общей прочности, что является предметом отдельного самостоятельного исследования.

Заключение

Комплекс исследований гидродинамических характеристик носовой оконечности судна нового типа и сопоставление их с характеристиками носовой оконечности традиционной формы позволяет сделать следующие выводы:

- вертикальные гидродинамические силы, действующие на носовую оконечность судна при зарывании в волну, для традиционной конструкции достигают максимальных значений $0,075 \cdot \Delta$ – $0,082 \cdot \Delta$ при отсутствии крена, для предложенной конструкции не превышают $0,08 \cdot \Delta$ во всём диапазоне углов крена, при этом предложенная носовая оконечность имеет более полные объёмы; кроме того, в предложенной конструкции равнодействующая гидродинамических сил давления находится строго в ДП и не создаёт дополнительных кренящих моментов, в отличие от носовых оконечностей традиционных типов;

- горизонтальные гидродинамические силы в предлагаемой конструкции не превышают 0,016 от водоизмещения, в традиционной — 0,029, при курсовом угле $\varphi = 180^\circ$ (носом на волну) гидродинамические силы в 5,5 раз ниже в предлагаемой конструкции, что позволяет обеспечить устойчивость на курсе;

- при движении судна носом на волну в новой конструкции вообще не создаётся кренящих моментов; на косых курсах незначительные кренящие моменты, которые по мере увеличения крена аннигилируются за счёт роста восстанавливающего момента, генерируемого бульбообразной наделкой корпуса;

- величину гидродинамического восстанавливающего момента можно регулировать, варьируя размерами бульбовой наделки (длиной и диаметром);

- буксировочное сопротивление корпуса предлагаемой и традиционной конструкции до скорости 13 узлов различается не более, чем на 2%, при скорости 22 узла буксировочное сопротивление для предлагаемой формы корпуса выше на 21%.

Следует отметить, что технология изготовления цилиндрических оболочек, из которых состоит

предложенная конструкция, не представляет затруднений, т.к. подобные конструкции формируются при изготовлении корпусов подводных лодок.

Таким образом, предложенная новая конструкция носовой оконечности судна позволяет успешно преодолевать штормовые условия плавания и обеспечивает безопасность как для судна, так и для экипажа.

Литература

1. Повреждения и пути совершенствования судовых конструкций / Н.В. Барабанов, Н.А. Иванов, В.В. Новиков, Г.П. Шемендюк. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
2. Повреждения судовых конструкций / Н.В. Барабанов [и др.]. Л.: Судостроение, 1977. 400 с.
3. Иванов Н.А., Каленчук С.В. Моделирование гидродинамических нагрузок, вызывающих повреждения носовых палубных конструкций // Материалы международной конференции «Кораблестроение и океанотехника. Проблемы и перспективы». Т. 1. Владивосток, 1998. С. 291–294.
4. Lawton G. Monsters of the Deep // New Scientist. 2001. V. 170, № 2297. P. 28 – 32.
5. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Дмитриевский В.А. Конструктивное обеспечение безопасности мореплавания: монография. 2-е изд., стер. СПб.: Лань, 2022. 300 с.
6. Чижиумов С. Д. Основы динамики судов на волнении: учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре : ГОУ ВПО «КНАГТУ», 2010. 110 с.
7. Park J.H., Choi J.E., Chun H.H. Hull-form optimization of KSUEZMAX to enhance resistance performance // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2015. 7(1). P. 100-114.
8. Храмушин В.Н. Поисковые исследования штормовой мореходности корабля. Владивосток: Дальнаука, 2003. 160 с.
9. Холодидин А.Н., Шмырев А.Н. Мореходность и стабилизация судов на волнении. Л.: Судостроение, 1976. 328 с.
10. Храмушин В.Н. Исследования по оптимизации формы корпуса корабля // Вестник ДВО РАН. 2003. №1(107). С. 50-65.
11. Hirota K., Matsumoto K., Takagishi K., Yamasaki K., Orihara H, Yoshida H. Development of bow shape to reduce the added resistance due to waves and verification on full scale measurement // First International Conference on Marine Research and Transportation, Ischia, Italy, 19–21 September 2005. P. 63-70.
12. Пат. 2487043 Рос. Федерация, МПК B63B 1/32, B63B 1/00. Корабль, остойчивый в штормовом плавании / Храмушин В.Н. № 2011129192; заявл. 12.07.2011; опубл. 20.01.2013, Бюл. № 2. 7 с.
13. Пат. 2607136 Рос. Федерация, МПК B63B 1/06, B63B 1/32, B63B 1/00. Носовая оконечность быстроходного надводного корабля или относительно тихоходного гражданского судна повышенной штормовой мореходности и ледовой проходимости в автономном плавании / Храмушин В.Н. № 2015107067; заявл. 02.03.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. 12 с.
14. Пат. 2374120 Рос. Федерация, МПК B63B 1/06. Конструкция передней части судна вытеснительного типа / Камсвог Э.Й. № 2007137131; заявл. 23.02.2006; опубл. 27.11.2009, Бюл. № 33. 11 с.
15. Pat. appl. 20120048164 US, IPC B 63 B 1/06. Ship's fore body form / Tvette M., Borgen H. № 13/146348; filled 27.01.2010; publ. 01.03.2012. 12 p.
16. Japan Marine United Corporation. Hydrodynamic Engineering. URL: <https://www.jmuc.co.jp/en/rd/hydrodynamics/> (дата обращения: 17.12.2023).
17. Matsumoto K. Ax-Bow: A new energy-saving bow shape at sea // NKK Tech. Rev. 2002. 86. P. 46–47.
18. Pat. 6601529 US, IPC B 63 B 3/00. Stabilized tumblehome hull form / Gabor Karafiath. № 09/888633; filled 21.06.2001; publ. 05.08.2003. 24 p.
19. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е. К вопросу о сценарии гибели судов во время шторма вследствие захвата волной их носовой оконечности // Морские интеллектуальные технологии. 2017. №4(38), т. 2. С. 27–33.
20. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е. К вопросу об определении нагрузки, действующей на палубу судна в носовой оконечности при ее залипании на встречном волнении // Морские интеллектуальные технологии. 2018. №4(42), т. 3. С. 19-25.
21. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Юсуп В.М. Исследование гидродинамических сил, действующих на носовую оконечность в условиях зарываемости судна в волну при движении косым курсом методом Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) // Морские интеллектуальные технологии. 2022. №4(58), ч. 3. С. 27–32.
22. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Юсуп В.М. Использование технологии SPH в задачах проектирования для обеспечения безопасности мореплавания // Материалы XXII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2021), 4–13 сентября 2021 г., Алушта. М.: Изд-во МАИ, 2021. С. 24–26.
23. Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics // Annual Reviews of Astronomy & Astrophysics. 1992. № 30. P. 543–574.
24. Crespo A. J. C., Domínguez J. M., Rogers B. D., Gómez-Gesteira M., Longshaw S., Canelas R., Vacondio R., Barreiro A., García-Feal O. DualSPHysics: open-source parallel CFD solver on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) // Comput. Phys. Commun. 2015. Vol. 187. P. 204–216.
25. Правила классификации и постройки морских судов. Часть IV. Остойчивость / Российский Морской Регистр судоходства. СПб.: РМРС, 2018. 82 с.
26. Бураковский П.Е. Исследование влияния конструктивных элементов на гидродинамические силы и моменты, действующие на носовую оконечность судна в условиях её зарываемости, с использованием

- технологии Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) // Морские интеллектуальные технологии. 2022. №4(58), ч.3. С. 39–45.
27. Пат. 2761360 Российская Федерация, МПК B63B 1/06, B63B 43/02. Носовая оконечность корпуса судна / Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Юсуп В.М. : заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ». № 2021111637; заявл. 22.04.2021; опубл. 07.12.2021, бюл. №34. 9 с.

References

1. Barabanov N.V., Ivanov N.A., Novikov V.V., Shemendyuk G.P. Povrezhdeniya i puti sovershenstvovaniya sudovykh konstruktсий [Damage and ways to improve ship structures]. 2 issue., revised and expanded. Leningrad, Sudostroenie, 1989. 256 p.
2. Barabanov N.V. i dr. Povrezhdenie sudovykh konstrukcij [Damage to ship structures]. Leningrad, Sudostroenie, 1977. 400 p.
3. Ivanov N.A., Kalenchuk S.V. Modelirovanie gidrodinamicheskikh nagruzok, vyzyvayushchikh povrezhdeniya nosovykh palubnykh konstruktсий [Modeling of hydrodynamic loads causing damage to bow deck structures]. Materialy mezhdunarodnoy konferentsii «Korablestroenie i okeanotekhnika. Problemy i perspektivy». Vol. 1. Vladivostok, 1998, pp. 291–294.
4. Lawton G. (2001) Monsters of the Deep. New Scientist, 170, № 2297, pp. 28 – 32.
5. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Dmitrovskiy V.A. Konstruktivnoe obespechenie bezopasnosti moreplavaniya: monografiya [Constructive provision of navigation safety: monograph]. 2 issue, stereotypical. Saint Petersburg, Lan', 2022. 300 p.
6. Chizhiumov S. D. Osnovy dinamiki sudov na volnenii [The fundamentals of ship dynamics on the waves]. Komsomol'sk-na-Amure, Komsomol'sk-na-Amure state technical university, 2010. 110 p.
7. Park J.H., Choi J.E., Chun H.H. (2015) Hull-form optimization of KSUEZMAX to enhance resistance performance. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 7(1), pp. 100-114.
8. Khramushin V.N. Poiskovye issledovaniya shtormovoy morekhodnosti korablya [Exploratory studies of the ship's storm seaworthiness]. Vladivostok, Dal'nauka, 2003. 160 p.
9. Kholodilin A.N., Shmyrev A.N. Morekhodnost' i stabilizatsiya sudov na volnenii [Seaworthiness and stabilization of ships in rough seas]. Leningrad, Sudostroenie, 1976. 328 p.
10. Khramushin V.N. (2003) Issledovaniya po optimizatsii formy korpusa korablya [Research on optimization of the shape of a ship's hull]. Vestnik DVO RAN, №1(107), pp. 50-65.
11. Hirota K., Matsumoto K., Takagishi K., Yamasaki K., Orihara H, Yoshida H. Development of bow shape to reduce the added resistance due to waves and verification on full scale measurement. First International Conference on Marine Research and Transportation, Ischia, Italy, 19–21 September 2005, pp. 63-70.
12. Patent 2487043 Russian Federation, IPC B63B 1/32, B63B 1/00. Korabl', ostoychivyy v shtormovom plavanii [A ship that is stable in stormy navigation]. Khramushin V.N. № 2011129192; filled 12.07.2011; publ. 20.01.2013, bulletin № 2. 7 p.
13. Patent 2607136 Russian Federation, IPC B63B 1/06, B63B 1/32, B63B 1/00. Nosovaya okonechnost' bystrokhodnogo nadvodnogo korablya ili otnositel'no tikhokhodnogo grazhdanskogo sudna povyshennoy shtormovoy morekhodnosti i ledovoy prokhozimosti v avtonomnom plavanii [The bow end of a high-speed surface ship or a relatively slow-moving civil vessel with increased storm seaworthiness and ice maneuverability in autonomous navigation]. Khramushin V.N. № 2015107067; filled 02.03.2015; publ. 10.01.2017, bulletin № 1. 12 p.
14. Patent 2374120 Russian Federation, IPC B63B 1/06. Konstruktsiya peredney chasti sudna vytesnitel'nogo tipa [Design of the front part of a displacement type vessel]. Kamsvog E.Y. № 2007137131; filled 23.02.2006; publ. 27.11.2009, bulletin № 33. 11 p.
15. Pat. appl. 20120048164 US, IPC B 63 B 1/06. Ship's fore body form. Tvette M., Borgen H. № 13/146348; filled 27.01.2010; publ. 01.03.2012. 12 p.
16. Japan Marine United Corporation. Hydrodynamic Engineering. URL: <https://www.jmuc.co.jp/en/rd/hydrodynamics/> (accessed on 17.12.2023).
17. Matsumoto K. (2002) Ax-Bow: A new energy-saving bow shape at sea. NKK Tech. Rev., 86, pp. 46–47.
18. Patent 6601529 US, IPC B 63 B 3/00. Stabilized tumblehome hull form. Gabor Karafiath. № 09/888633; filled 21.06.2001; publ. 05.08.2003. 24 p.
19. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E. (2017) K voprosu o stsennariy gibeli sudov vo vremya shtorma vsledstvie zakhvata volnoy ikh nosovoy okonechnosti [More on the wreck of ship scenarios during a storm due to the seizure by the wave of their fore end]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, №4(38), vol.2, pp.27–33.
20. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E. (2018) K voprosu ob opredelenii nagruzki, deystvuyushchey na palubu sudna v nosovoy okonechnosti pri ee zalivanii na vstrechnom volnenii [To the question of determining the load acting on the deck of the vessel in the bow at its flooding in oncoming waves]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, №4(42), vol. 3, pp.19–25.
21. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Yusyp V.M. (2022) Issledovanie gidrodinamicheskikh sil, deystvuyushchikh na nosovuyu okonechnost' v usloviyakh zaryvaemosti sudna v volnu pri dvizhenii kosym kursom metodom Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) [Study of the hydrodynamic forces acting on the bow when the vessel is buried in a wave when moving on an oblique course using the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, №4(58), part. 3, pp 27–32.
22. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Yusyp V.M. Ispol'zovanie tekhnologii SPH v zadachakh proektirovaniya dlya obespecheniya bezopasnosti moreplavaniya [Use of SPH technology in design tasks to ensure navigation safety]. Materialy XXII Mezhdunarodnoy konferentsii po vychislitel'noy mekhanike i sovremennym prikladnym programmnyy sistemam (VMSPPS'2021), 4–13 September 2021, Alushta. Moscow, MAI Publ., 2021, pp. 24–26.

23. Monaghan J. J. (1992). Smoothed particle hydrodynamics. Annual Reviews of Astronomy & Astrophysics, № 30, pp. 543–574.
24. Crespo A. J. C., Domínguez J. M., Rogers B. D., Gómez-Gesteira M., Longshaw S., Canelas R., Vacondio R., Barreiro A., García-Feal O. (2015). DualSPHysics: open-source parallel CFD solver on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Comput. Phys. Commun., vol. 187, pp. 204–216.
25. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov [Rules for the classification and construction of ships]. Part IV. Stability. Saint Petersburg, Russian register of shipping, 2018. 82 p.
26. Burakovskiy P.E. (2022) Issledovanie vliyaniya konstruktivnykh elementov na gidrodinamicheskie sily i momenty, deystvuyushchie na nosovuyu okonechnost' sudna v usloviyakh ee zaryvaemosti, s ispol'zovaniem tekhnologii Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) [Study of the influence of structural elements on hydrodynamic forces and moments acting on the bow end of the vessel under conditions of its being buried, using Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) technology] / Morskie intellektual'nye tekhnologii, №4(58), part. 3, pp. 39–45.
27. Patent 2761360 Russian Federation, IPC B63B 1/06, B63B 43/02. Nosovaya okonechnost' korpusa sudna [Bow of the ship's hull]. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Yusyp V.M. № 2021111637; filled 22.04.2021; publ. 07.12.2021, bulletin №34. 9 p.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бураковский Евгений Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры устройства и живучести корабля, филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала Н.Г. Кузнецова» в г. Калининграде, 236036, г. Калининград, Советский проспект, 82, e-mail: e_burakovsky@mail.ru

Evgeny P. Burakovskiy, Dr. Sci. (Eng), professor of the Department of Theory and Survivability of the Ship, Admiral N. G. Kuznetsov Naval Academy (Branch Kaliningrad), Sovetskiy ave, 82, Kaliningrad, 236036, Russian Federation, e-mail: e_burakovsky@mail.ru

Бураковский Павел Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовождения и безопасности мореплавания, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, Калининградский государственный морской технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: paul_b@mail.ru

Pavel E. Burakovskiy, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Navigation and Maritime Safety, Baltic Fishing Fleet State Academy, Kaliningrad state marine technical University, Sovetskiy ave, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: paul_b@mail.ru

Веревошкин Андрей Владимирович, кандидат технических наук, заместитель начальника кафедры устройства и живучести корабля, филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала Н.Г. Кузнецова» в г. Калининграде, 236036, г. Калининград, Советский проспект, 82, e-mail: aaa-andrey@mail.ru

Andrey V. Verevochkin, Ph.D. (Eng), Deputy Head of Department of Theory and Survivability of the Ship, Admiral N. G. Kuznetsov Naval Academy (Branch Kaliningrad), Sovetskiy ave, 82, Kaliningrad, 236036, Russian Federation, e-mail: aaa-andrey@mail.ru

Юсyp Вячеслав Михайлович, начальник кафедры устройства и живучести корабля, филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала Н.Г. Кузнецова» в г. Калининграде, 236036, г. Калининград, Советский проспект, 82, e-mail: v-y48@yandex.ru

Vyacheslav M. Yusyp, head of the Department of Theory and Survivability of the Ship, Admiral N. G. Kuznetsov Naval Academy (Branch Kaliningrad), Sovetskiy ave, 82, Kaliningrad, 236036, Russian Federation, e-mail: v-y48@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 25.01.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 29.01.2024.

Научная статья

УДК 532.5.013

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.006>

Анализ работы роторно-винтового движителя в воде

Шапков Е.В.^{1,2} egorshapkov@yandex.ru, Тряскин Н.В.¹ nikita.tryaskin@smtu.ru,Андрюшин А.В.² andryushinAV@cniimf.ru¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет²Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота

Аннотация. Интенсивная промышленная разработка углеводородов на Арктическом шельфе России в регионах с разнообразной природно-климатической обстановкой обуславливает создание амфибийных транспортных средств. Последние могут быть разработаны на базе роторно-винтовых движителей. В статье представлен анализ работы роторно-винтового движителя в воде. На основании анализа предыдущих проектов транспортных средств с РВД сформирован прототип движителя для исследования его гидродинамических характеристик. В пакете вычислительной гидродинамики с открытым исходным кодом OpenFOAM сформирована расчетная CFD-модель РВД, работающего в «свободной» воде. По результатам вычислительных экспериментов описаны характерные особенности обтекания РВД, как движителя, а также выполнен анализ влияния числа Рейнольдса на возникающие интегральные характеристики. Отмечен диапазон автомательности гидродинамических характеристик РВД от числа Рейнольдса. Выполнено моделирование работы РВД с различными значениями относительной поступи, построены кривые действия РВД в свободной воде. Полученные результаты в достаточной степени качественно и количественно согласуются с экспериментальными данными Б.Н. Коула.

Ключевые слова: роторно-винтовой движитель, РВД, CFD, численное моделирование, uRANS, гидродинамические характеристики РВД, OpenFOAM, испытания в свободной воде

Для цитирования: Шапков Е.В., Тряскин Н.В., Андрюшин А.В. Анализ работы роторно-винтового движителя в воде. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 59—65. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.006

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.006>

Analysis of auger propulsor performance in water

Egor V. Shapkov^{1,2} egorshapkov@yandex.ru, Nikita V. Tryaskin¹ nikita.tryaskin@smtu.ru, Alexander V.Andryushin² andryushinAV@cniimf.ru¹St. Petersburg state marine technical University, ²Central Marine Research and Design Institute (CNIIMF)

Abstract. The creation of amphibious vehicles is due to the intensive development of hydrocarbons on the Russian Arctic shelf in regions with diverse natural and climatic conditions. These machines can be developed on the basis of auger propulsors. The analysis of the auger propulsor performance under open water conditions is presented in the paper. The propulsor prototype for investigation its hydrodynamic characteristics has been formulated using results of previous auger vehicles operating and designing experience. The numerical model of the auger propulsor for open water conditions was generated using open-source computational fluid dynamics Software OpenFOAM. The Reynolds equations coupled with k- ω SST turbulence model is used. The typical features of flow over auger propulsor are described. The Reynolds number influence on the auger propulsor integral characteristics has been analysed. The auger propulsor simulation depending on advance coefficient was carried out to obtain its open water hydrodynamic characteristics. The simulation results well correspond to experimental data obtained by B.N.Cole.

Keywords: auger propulsor, auger, CFD, numerical simulation, uRANS, auger hydrodynamic characteristics, OpenFOAM, open water tests

For citation: Egor V. Shapkov, Nikita V. Tryaskin, Alexander V. Andryushin. Analysis of auger propulsor performance in water, Marine intellectual technologies 2024. № 1 part 1, P. 59—65. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.006

Введение

В настоящее время большой практический интерес представляют амфибийные транспортные средства, которые могут использоваться в различных эксплуатационных условиях: чистая вода, ледовые акватории, заснеженные и заболоченные районы. Такие амфибийные средства могут разрабатываться на базе роторно-винтовых движителей РВД [1-3]. Поэтому, при проектировании таких амфибийных средств определение гидродинамических характеристик РВД является одной из основных задач.

Фундаментальный вклад в научное исследование гидродинамических (пропульсивных) характеристик РВД в различных средах, в том числе в воде, внес Б.Н. Коул [4]. В своей работе автор исследовал интегральные характеристики моделей РВД в различных средах (опорных основаниях), а также их общую производительность. Б.Н. Коул спроектировал экспериментальную установку и испытал модели РВД в «стоячей» воде (на швартовном режиме, $J = 0$), дополнительно исследуя влияние основных геометрических параметров РВД на показатели его работы. Анализируя полученные результаты теоретического и экспериментального

исследований, автор формулирует понятие гидравлического сечения – описание структуры внешнего обтекания РВД при его работе в воде (рисунок 1), а также вводит эмпирическую зависимость для определения коэффициента полезного действия (КПД) РВД (1), с использованием которой автор отмечает хорошую согласованность с результатами модельных экспериментов [4].

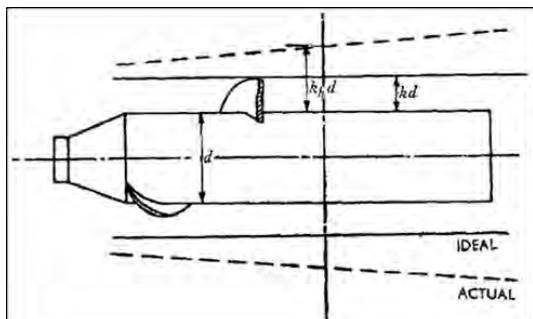


Рис. 1. Гидравлическое сечение РВД по Б.Н. Коулу [4]

$$\eta_0 = \frac{J[(1-s)\tan\varphi - J]}{s(1 + 2k_h + 2k_h^2)}, \quad (1)$$

где s – коэффициент вращения (относительное угловое скольжение), см. [4]; k_h – эффективное гидродинамическое значение отношения высоты винтовой линии к диаметру базового цилиндра, см. [4]; φ – угол наклона винтовой линии РВД; $J = \frac{V}{\pi d n}$ – относительная поступь РВД по Коулу, в которой V – скорость; d – диаметр базового цилиндра; n – скорость вращения РВД.

В исследовании А.В. Согина и В.А. Шапкина [5] представлена методика физического моделирования движения роторно-винтовой машины по воде, а также приведены результаты физического моделирования «водоходных» параметров РВД. В работе дополнительно представлены авторские аналитические зависимости для силы тяги (упора) РВД, для случаев полного или частичного погружения ротора в воду. В последней авторы используют эмпирические коэффициенты, учитывающие особенность обтекания РВД, сформулированные Б.Н. Коулом [4].

В работе [6] выполнено экспериментальное исследование гидродинамических характеристик подруливающего устройства с РВД. По результатам экспериментальных исследований авторы уделяют особое внимание обтеканию кормовой оконечности базового цилиндра РВД. Показано, что отсутствие кормового обтекателя благоприятно сказывается на формировании отрывной зоны (так называемой «зоны мертвой воды», the dead water zone). Напротив, наличие кормового обтекателя снижает сопротивление движителя и, соответственно, благоприятно влияет на его эффективность (КПД). Авторы работы отмечают надежду на дальнейшие параметрические исследования характеристик подобных движителей.

Создание роторно-винтового движителя технологических амфибийных машин, работающих в арктических районах является сложной технической проблемой, решение которой предполагает

необходимость совместного обеспечения эффективной эксплуатации в воде, на ледовом покрове, а также в воде со льдом, что подразумевает нахождение «разумного» баланса между гидродинамическими (пропульсивными) характеристиками и прочностью конструкции РВД.

В настоящей работе, на основе результатов вычислительного эксперимента, выполнен анализ работы роторно-винтового движителя в вязкой жидкости, и возникающих при этом гидродинамических реакций на элементах конструкции РВД. Численное моделирование реализовано в программном пакете вычислительной гидродинамики с открытым исходным кодом OpenFOAM. Описана принципиальная картина обтекания РВД, при его работе в открытой воде, а также выполнено исследование влияния числа Рейнольдса (масштабного эффекта) на гидродинамические характеристики РВД.

Описание конструкции роторно-винтового движителя

Анализ широкого ряда роторно-винтовых движителей различных масштабов и конструкций, представленный, в частности, в [3], показывает, что конструкцию РВД можно описать следующими основными геометрическими характеристиками (рисунок 2):

- Габаритная длина (L);
- Габаритный диаметр (D);
- Диаметр базового цилиндра (d);
- Угол наклона винтовой линии (φ);
- Высота винтовой линии (h).

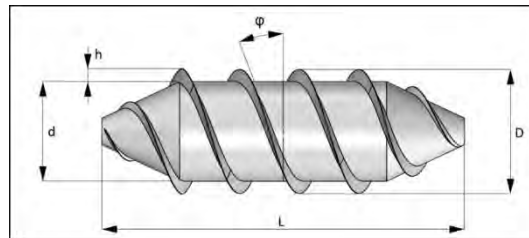


Рис. 2. Эскиз РВД с основными геометрическими характеристиками

Математическая постановка задачи

В настоящем разделе представлено описание расчетной модели роторно-винтового движителя, работающего в воде, для определения его гидродинамических характеристик.

Уравнения движения

Модель движения вязкой несжимаемой жидкости, которая описывается осреднёнными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса и неразрывности [7] (2-3) используется для описания движения турбулентного потока. Полученная система уравнений дополняется гипотезой Буссинеска [8-9] (4) и замыкается двухпараметрической, универсальной моделью турбулентности Ментера [10]. Численная аппроксимация реализована методом контрольного объема (МКО) [11-12].

Вращение РВД реализуется методом скользящей сетки AMI (Arbitrary Mesh Interface) [13-14], хорошо себя зарекомендовавшим в решении судостроительных задач, в частности, в вопросах

проектирования и определения гидродинамических характеристик гребных винтов [15].

$$\frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle U_i U_j \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial (\langle \Omega_i \rangle \times \langle U_i \rangle)}{\partial x_i} = \langle F_i \rangle - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\langle \tau_{ji} \rangle + \mu \left(\frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \rho \langle U_i' U_j' \rangle \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_i} = 0; \quad (3)$$

$$-\langle U_i' U_j' \rangle = 2\mu_t \langle S_{ij} \rangle - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4)$$

Граничные условия

На рисунке 3 представлена расчетная область для моделирования работы РВД в воде. На ее границах задаются следующие условия.

- поверхность РВД (RVD): $U = 0$, $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$; «пристеночные» функции для параметров модели турбулентности k , ω и ν_t ;
- входная граница (inlet): $U = U_0$; $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$; $k = \frac{3}{2} (U_0 I)^2$; $\omega = \frac{k}{\nu} \left(\frac{\mu_t}{\mu} \right)^{-1}$; $\nu_t = 0$;
- выходная граница (outlet): $\frac{\partial U}{\partial n} = 0$; $P = P_0$; $\frac{\partial k}{\partial n} = 0$; $\frac{\partial \omega}{\partial n} = 0$; $\frac{\partial \nu_t}{\partial n} = 0$;
- внешняя граница (outerCylinder): $U_n = 0$; $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$; $\frac{\partial k}{\partial n} = 0$; $\frac{\partial \omega}{\partial n} = 0$; $\frac{\partial \nu_t}{\partial n} = 0$.

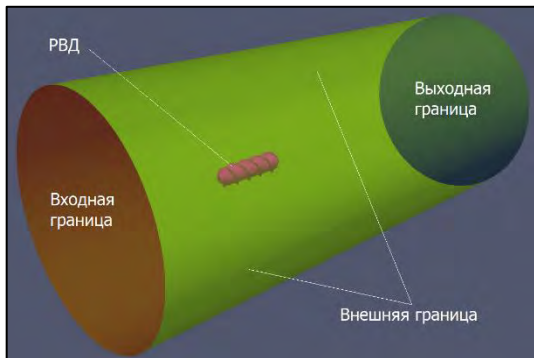


Рис. 3. Общий вид расчетной области

Сформированная система дифференциальных уравнений решается с помощью метода контрольного объема и алгоритма PISO [16]. Для дискретизации расчетной области используются неструктурированная сетка. Шаг интегрирования уравнений движений соответствует критерию Куранта-Фридрихса-Леви $CFL \leq 0,5$.

Определение сеточно-независимого решения

Для определения сеточно-независимого решения были сформированы три расчетные области: сетка №1 – 447 585 ячеек, сетка №2 – 3 396 771 ячеек, сетка №3 – 6 618 831 ячеек. Контролируемыми параметрами выбраны коэффициенты гидродинамического упора и момента РВД (5-6).

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (5)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (6)$$

где K_T – коэффициент гидродинамического упора РВД; K_Q – коэффициент гидродинамического момента РВД; T – гидродинамический упор, Н; Q – гидродинамический момент, Н·м; ρ – плотность воды, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; n – скорость вращения, $\frac{\text{об}}{\text{сек}}$; D – габаритный диаметр, м.

По результатам исследования сеточно-независимого решения, представленным на рисунке 4, для дальнейших расчетов роторно-винтового движителя принята сетка №2. Безразмерное расстояние от стенки до центра первой ячейки составляет $y^+ = 90 - 250$.

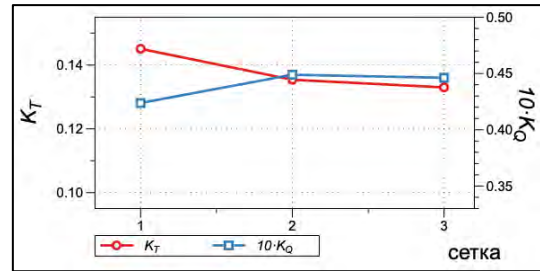


Рис. 4. Результаты исследования сеточно-независимого решения

Результаты численного моделирования

Ниже представлены безразмерные геометрические параметры исследуемого прототипа роторно-винтового движителя, сформированного по эскизу, представленному на рисунке 2, а также начальные условия и режимы работы модели РВД. Число Рейнольдса и относительная поступь РВД определялись по формулам (7-8) соответственно.

$$Re = \frac{wLD}{2\nu}, \quad (7)$$

$$J = \frac{U}{nD} \quad (8)$$

где $w = 2\pi n$ – скорость вращения для определения числа Рейнольдса РВД, $\frac{\text{рад}}{\text{сек}}$; n – скорость вращения РВД, $\frac{\text{об}}{\text{сек}}$; L – габаритная длина, м; D – габаритный диаметр, м; ν – кинематическая вязкость воды, $\frac{\text{м}^2}{\text{сек}}$; U – скорость набегающего потока, м/с.

Начальные условия:

- Хар-ки жидкости (воды): $t = 17^\circ\text{C}$; $\rho = 998 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 1,028 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;
- Пар-ры турбулентности: $\frac{\mu_t}{\mu} = 10$; $I = 0,5\%$.

Основные геометрические характеристики РВД:

$$\frac{L}{D} \sim 3; \varphi = 20; \frac{h}{D} \sim 0,15.$$

Режимы работы модели РВД:

- Влияние Re: $Re = (2; 3,6; 4,8; 7,3; 11) \cdot 10^6$.
- Кривые действия РВД: $J = 0,1; 0,3; 0,5$.

Результаты расчета модели РВД при разных числах Рейнольдса (изменение скорости вращения модели РВД) представлены на рисунках 5-6. Анализ показывает, что силы трения играют значительную роль в формировании гидродинамического момента РВД K_Q (до ~30%). Последнее естественным образом обусловлено большой смоченной поверхностью РВД, полностью погруженного в воду.

Влияние трения на упор РВД K_T менее значительно, чем на момент ($\sim 8\%$).

Необходимо отметить, что в диапазоне чисел Рейнольдса РВД, начиная с $Re \sim 5 \cdot 10^6$, наступает режим автомодельности [17]. Указанные обстоятельства необходимо учитывать при проектировании полномасштабных транспортных средств с РВД и оценке их ходкости в воде.

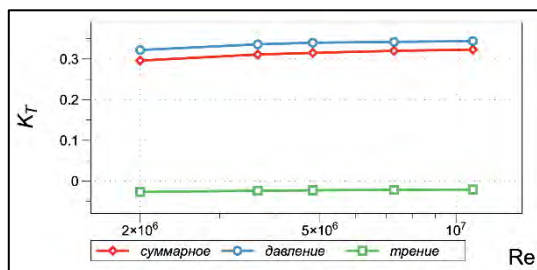


Рис. 5. Результаты расчета модели РВД при разных числах Рейнольдса. Коэффициент гидродинамического упора РВД и его составляющие

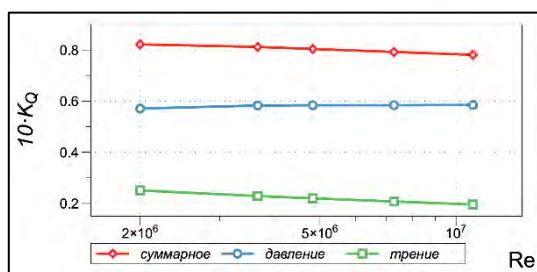


Рис. 6. Результаты расчета модели РВД при разных числах Рейнольдса. Коэффициент гидродинамического момента РВД и его составляющие

На рисунках 7-8 представлена визуализация обтекания модели изолированного РВД водой (поля кинематического давления и скорости), по результатам анализа которой можно утверждать, что поле безразмерного (кинематического) давления ($\frac{\text{Давление}}{\text{Плотность}}$) указывает на четкое формирование областей (зон) пониженного и повышенного давлений со стороны засасывающей и нагнетающей поверхностей винтовой линии РВД, см. рисунок 7. Указанный эффект (перепад давлений) естественным образом формирует осевую силу (упор) РВД. Анализ поля безразмерной скорости показывает, что в зоне за двигателем формируется «спутная струя» (гидродинамический след, см. рисунок 8) за счет сходящих с кормовых участков винтовой линии РВД концевых вихрей. Также в описанной области наблюдается локальное отрывное течение, сопровождающееся образованием дискретных вихрей. Указанный эффект характерен для плохообтекаемых тел, имеющих изломы контура (острые кромки) [17]. Иными словами, шнековый движитель имеет отрывной характер обтекания, соответствующий экспериментальным подтверждениям наличия «зоны мертвой воды» (the dead water zone) за РВД, см. [6]. На рисунке 9 представлено поле скорости. Наблюдается вихревая структура, соответствующая гидравлическому сечению, описанному в работе [4]. Необходимо отметить, что эффект расширения

гидравлического сечения, по мере продвижения жидкости вдоль РВД, качественно соотносится с ростом пограничного слоя вдоль пластины [17].

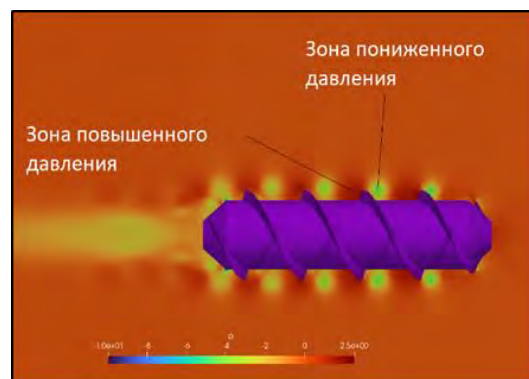


Рис. 7. Визуализация обтекания модели РВД. Поле кинематического давления, $J = 0,5$

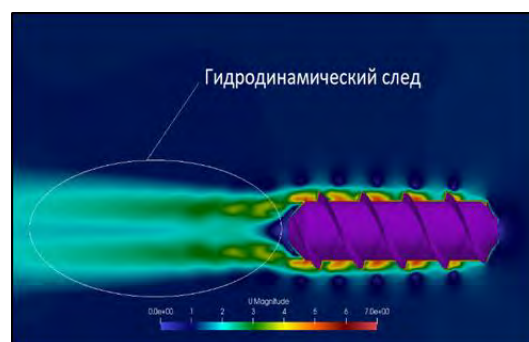


Рис. 8. Визуализация обтекания модели РВД. Поле безразмерной скорости, $J = 0,5$

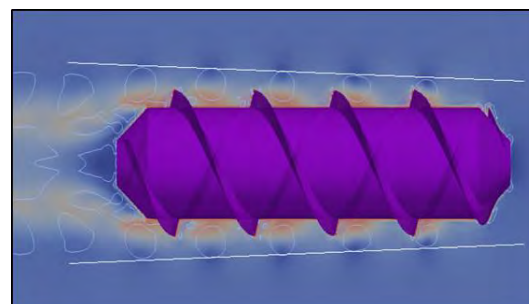


Рис. 9. Гидравлическое сечение при обтекании модели РВД (см. рисунок 1), расчет CFD. $J = 0,5$

На рисунке 10 представлены гидродинамические характеристики исследуемого прототипа РВД при скорости вращения, соответствующей режиму автомодельности по числу Рейнольдса (см. выше). Дополнительно, на рисунке 10 представлены значения КПД двигателя, рассчитанные в соответствии с зависимостью (1), предложенной Б.Н. Коулом на базе экспериментальных данных.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Высокий гидродинамический момент объясняется большой смоченной поверхностью движителя, см. выше. Последнее приводит к низкому показателю гидродинамической эффективности (КПД) РВД, что, тем не менее, компенсируется полезной плавучестью полностью погруженного в воду РВД, обеспечивающего амфибийные свойства транспортному средству с роторно-винтовым

двигателем. Дополнительно стоит отметить приемлемую качественную и количественную согласованность результатов численного моделирования с прогнозом Б.Н. Коула, базирующемся на экспериментальных данных.

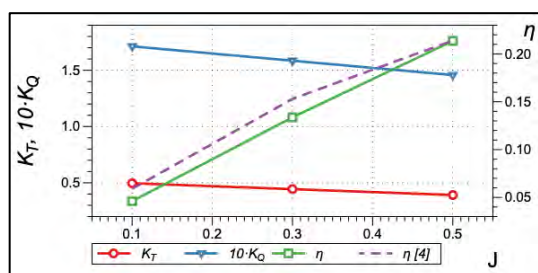


Рис. 10. Гидродинамические характеристики (кривые действия) роторно-винтового двигателя

Заключение

В представленной работе выполнен анализ гидродинамических характеристик роторно-винтового двигателя, работающего в открытой воде, а также выполнен обзор актуальных исследований. В пакете вычислительной гидродинамики OpenFOAM сформулирована математическая модель для определения гидродинамических характеристик изолированного РВД. На основании комплексного анализа полученных результатов сформулированы основные выводы относительно структуры обтекания РВД водой, а также о влиянии масштабного эффекта (числа Рейнольдса) на силовые характеристики РВД.

Анализ физических полей, при работе РВД в воде, показал, что обтекание РВД носит отрывной характер, негативно сказывающийся на его гидродинамических и, соответственно, пропульсивных характеристиках, а упор РВД формируется за счет перепада давления на элементе винтовой линии, формирующегося за счет наличия зоны повышенного и пониженного давления на нагнетающей и засасывающей поверхности. Повышение КПД РВД, за счет снижения негативного влияния отрывного характера течения в кормовой части РВД, целесообразно достигать применением специального оформления торцов базового цилиндра РВД, например, сфера, эллипс, конус. Выполнено исследование влияния числа Re (вязкости) на гидродинамические характеристики РВД, работающего в открытой воде. Отмечено, что в диапазоне чисел Рейнольдса РВД, начиная с $Re \sim 5 \cdot 10^6$, наступает режим автомодельности. Вместе с тем результаты анализа численного моделирования CFD показали, что силы трения вносят до 30% и до 8-10% в формирование гидродинамического момента и упора РВД соответственно. Указанные обстоятельства необходимо учитывать при прогнозировании гидродинамических и пропульсивных характеристик на полноразмерные РВД.

Результаты численного моделирования работы РВД в воде, качественно, и в достаточной степени количественно, согласуются с экспериментальными данными Б.Н. Коула.

Литература

1. Котляренко В.И., Барахтанов Л. В. Обзор основных типов двигателей транспортных средств высокой проходимости // Журнал автомобильных инженеров. – 2016. - №6 (101) 2016. – С. 24-29.
2. Дорофеев Р.А. Многофункциональный мобильный комплекс транспортно-технологических машин для Арктики. – НГТУ им Р.Е. Алексеева, RAO/CIS OFFSHORE, СПб, 2017.
3. В.Е. Колотилин, А.В. Михеев, П.О. Береснев, А.М. Беляев, А.В. Папунин, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков, А.А. Куркин. Статистическая модель выбора геометрических параметров, массово-инерционных и мощностных характеристик транспортно-технологических машин на роторно-винтовых двигателях // Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева – Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева № 3(110). Наземные транспортные системы. – Нижний Новгород. - 2015. – с. 156 – 208.
4. B. N. Cole, Inquiry into Amphibious Screw Traction, Applied Mechanics Group, Institution of Mechanical Engineers Proceedings 176(19), 919-940, 1961.
5. А.В. Согин, В.А. Шапкин. Исследование движения роторно-винтовой машины (РВМ) по воде // Известия вузов. МАШИНОСТРОЕНИЕ. – 2006. - № 5. - С. 54-64.
6. Kazuo Suzuki, Motoi Kasahara, Shohei Ohji. Open Water Tests of Unconventional Ducted Propulsor without Rotating Blades in Circulating Water Channel. Fifth International Symposium on Marine Propulsors smp'17, Espoo, Finland, June 2017.
7. Али Р., Трякин Н.В. Изучение влияния относительного взаимного расположения двух движущихся параллельно судов на их гидродинамические характеристики. Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – № 4-3(50). – С. 59-65. – DOI 10.37220/MIT.2020.50.4.042.
8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с., 311 ил., 22 табл. – (Классики отечественной науки).
9. Boussinesq J. Essai sur la théorie des eaux courantes. – Paris: Mémoires présentées par divers savants à l'Acad. d. Sci., 1877, v. 23.
10. F.R. Menter, M. Kuntz, and R. Langtry. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. In Proceedings of the fourth international symposium on turbulence, heat and mass transfer, pages 625–632, Antalya, Turkey, 2003. Begell House.
11. Патанкар С. В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах – Computation of conduction and Duct Flow Heat Transfer: Пер. с англ. — М.: Издательство МЭИ, 2003. — 312 с.
12. Бесядовский А.Р. Численные методы в гидромеханике: учеб. пособие А.Р. Бесядовский. – СПб.: Изд-во СПбГМУ. – 2018. – 151 с.

13. Winter M. Benchmark and validation of Open Source CFD codes, with focus on compressible and rotating capabilities, for integration on the SimScale platform - Chalmers University of Technology.-68 s. 2013.
14. P.E. Farrell, J.R. Maddison, Conservative interpolation between volume meshes by local Galerkin projection, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. (2010), doi:10.1016/j.cma.2010.07.015.
15. Yijie Liu, Decheng Wan. Energy Saving Mechanism of Propeller with Endplates at Blade Tips, ICCM2019, 9th-13th July 2019, Singapore.
16. R.I. Issa. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. Journal of Computational Physics, 62(1):40–65, 1986.
17. Справочник по теории корабля: в трех томах // Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители/Под ред. Я. И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 768 с.

References

1. Kotlyarenko V.I., Barahtanov L.V. Review of the main types of propulsion vehicles for off-road vehicles // Journal of Automotive Engineers. – 2016. - №6 (101) 2016. – p. 24-29.
2. Dorofeev R.A. Multifunctional mobile complex of transport and technological machines for the Arctic. – Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, RAO/CIS OFFSHORE, SPb, 2017.
3. V.E. Kolotilin, A.V. Miheev, P.O. Beresnev, A.M. Belyaev, A.V. Papynin, V.C. Makarov, D.V. Zezyulin, V.V. Belyakov, A.A. Kurkin. Statistical model for the selection of geometric parameters, mass-inertial and power characteristics of transport and technological machines using rotary screw propulsors // Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev – Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseeva № 3(110). Ground transportation systems. – Nizhny Novgorod. - 2015. – p. 156 – 208.
4. B. N. Cole, Inquiry into Amphibious Screw Traction, Applied Mechanics Group, Institution of Mechanical Engineers Proceedings 176(19), 919-940, 1961.
5. A.V. Sogin, V.A. Shapkin. Study of the movement of a rotary-screw machine (RSM) on water // News from universities. MECHANICAL ENGINEERING. - 2006. - № 5. - p. 54-64.
6. Kazuo Suzuki, Motoi Kasahara, Shohei Ohji. Open Water Tests of Unconventional Ducted Propulsor without Rotating Blades in Circulating Water Channel. Fifth International Symposium on Marine Propulsors smp'17, Espoo, Finland, June 2017.
7. Ali R., Tryaskin N.V. Study of the influence of the relative relative position of two ships moving in parallel on their hydrodynamic characteristics. Marine Intellectual Technologies. – 2020. – № 4-3(50). – p. 59-65. – DOI 10.37220/MIT.2020.50.4.042.
8. Loytsyanskiy L.G. Mechanics of liquid and gas: Textbook. for universities. – 7d ed., corr. – M.: Drofa, 2003. – 840 p., 311 ill., 22 tabl. – (Classics of Russian science).
9. Boussinesq J. Essai sur la théorie des eaux courantes. – Paris: Mémoires présentées par diverses savants à l'Acad. d. Sci., 1877, v. 23.
10. F.R. Menter, M. Kuntz, and R. Langtry. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. In Proceedings of the fourth international symposium on turbulence, heat and mass transfer, pages 625–632, Antalya, Turkey, 2003. Begell House.
11. Patankar S.V. Numerical solution of problems of thermal conductivity and convective heat transfer during flow in channels = Computation of conduction and Duct Flow Heat Transfer: Tr. from eng. — M.: Publishing house MEI, 2003. — 312 p.
12. Besyadovskiy A.R. Numerical methods in hydromechanics: textbook. allowance A.R. Besyadovskiy. – SPb.: Publishing house of SMTU. – 2018. – 151 p.
13. Winter M. Benchmark and validation of Open Source CFD codes, with focus on compressible and rotating capabilities, for integration on the SimScale platform - Chalmers University of Technology.-68 s. 2013.
14. P.E. Farrell, J.R. Maddison, Conservative interpolation between volume meshes by local Galerkin projection, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. (2010), doi:10.1016/j.cma.2010.07.015.
15. Yijie Liu, Decheng Wan. Energy Saving Mechanism of Propeller with Endplates at Blade Tips, ICCM2019, 9th-13th July 2019, Singapore.
16. R.I. Issa. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. Journal of Computational Physics, 62(1):40–65, 1986.
17. Handbook of ship theory: in three volumes // Volume 1. Fluid mechanics. Resistance to vessel traffic. Ship propulsors/Ed. Ya. I. Voitkunsky. – L.: Shipbuilding, 1985. – 768 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

Шапков Егор Владимирович, младший научный сотрудник лаборатории пропульсивных комплексов судов (№ 44) ЦНИИМФ, аспирант кафедры гидроаэромеханики и морской акустики СПбГМТУ, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: egorshapkov@yandex.ru

Egor V. Shapkov, junior scientist of the Laboratory of Propulsion Complexes of Ships (44) CNIIMF, graduate student, Department of the fluid mechanics and marine acoustics, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: egorshapkov@yandex.ru

Тряскин Никита Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидроаэромеханики и морской акустики СПбГМТУ, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: nikita.tryaskin@smtu.ru

Nikita V. Tryaskin, Ph.D. (Eng.), assistant professor, assistant professor of the Department of the fluid mechanics and marine acoustics St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: nikita.tryaskin@smtu.ru

Андрюшин Александр Владиславович, доктор технических наук, начальник лаборатории пропульсивных комплексов судов (№ 44) ЦНИИМФ, 191015, Санкт-Петербург, ул. Кавалергардская, 6, лит. А, e-mail: andryushinAV@cniimf.ru

Alexander V. Andryushin, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Propulsion Complexes of Ships (44), CNIIMF, Kavalergardskaya, 6, lit. A, St. Petersburg, 191015, Russian Federation, e-mail: andryushinAV@cniimf.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 18.12.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.01.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 20.01.2024.

Научная статья

УДК 656.61.052

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.007>

Прогнозирование маршрутов движения морских беспилотных транспортных объектов в реальных условиях плавания на основе характеристической модели глобального поля течений

Маевский А.М.¹ maevskiy_andrey@mail.ru¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье рассматривается процесс разработки системы прогнозирования поведения морских беспилотных транспортных объектов (в том числе безэкипажных судов и морских робототехнических комплексов) – одной из важнейших систем, отвечающей за безопасное перемещение в экстремальных морских условиях. Также рассматривается вопрос актуальности использования беспилотных судов. Отмечается развитие технических средств в сфере морского судостроения. Аргументируются преимущества применения беспилотных судов и выявляются перспективы, связанные с их внедрением: снижение аварийности за счет исключения человеческого фактора, уменьшение негативного воздействия на окружающую среду, повышение надежности перевозок благодаря изменениям в конструкции судов, повышение экономической эффективности из-за отсутствия необходимости обеспечения экипажа и другие преимущества. В статье приводится процесс интегрирования и учета имеющихся карт течений в систему планирования траектории перемещения беспилотных транспортных объектов. Подробно описывается процесс моделирования работы системы планирования перемещения беспилотных транспортных объектов в условиях известной карты течения для различных акваторий Российской Федерации.

Ключевые слова: Система планирования, безэкипажное судно, автоматизация, система управления, морская робототехника, течения, карты течений.

Для цитирования Маевский А.М. Прогнозирование маршрутов движения морских беспилотных транспортных объектов в реальных условиях плавания на основе характеристической модели глобального поля течений. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 66—72. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.007

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.007>

Prediction of movement routes of marine unmanned transport objects in real navigation conditions based on a characteristic model of the global current field

Andrey M. Maevskiy¹ maevskiy_andrey@mail.ru¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The article discusses the process of developing a system for predicting the behavior of marine unmanned transport objects (including unmanned ships and marine robotic systems) - one of the most important systems responsible for safe movement in extreme marine conditions. The issue of the relevance of using unmanned ships is also considered. The development of technical means in the field of marine shipbuilding is noted. The advantages of using unmanned ships are argued and the prospects associated with their implementation are identified: reducing accident rates by eliminating the human factor, reducing the negative impact on the environment, increasing the reliability of transportation due to changes in the design of ships, increasing economic efficiency due to the absence of the need to provide a crew, and others advantages. The article describes the process of integrating and taking into account existing current maps into a system for planning the trajectory of unmanned transport objects. The process of modeling the operation of a system for planning the movement of unmanned transport objects under the conditions of a known current map for various water areas of the Russian Federation is described in detail.

Key words: Planning system, unmanned vessel, automation, control system, marine robotics, currents, current maps.

For citation: Andrey M. Maevskiy Prediction of movement routes of marine unmanned transport objects in real navigation conditions based on a characteristic model of the global current field. Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 66—72. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.007

Введение

Интерес к беспилотным судам увеличивается с каждым годом. Участие в разработке и внедрении подобной технологии представляет собой возможность для любой страны развивать новое перспективное направление с использованием высоких технологий. Для России это также шанс опережающего внедрения инноваций на мировом рынке, что способствует укреплению

конкурентоспособности морских компаний и уменьшению зависимости от зарубежных технологий. Академия водного транспорта Российского университета транспорта анонсировала стратегический проект № 3 на тему «Электронная навигация и беспилотное (автономное) судовождение», срок реализации которого 2021–2030 гг. Основная цель проекта: технологическое лидерство в сфере электронной навигации и безэкипажного (автономного) судовождения.

где $T_{i1} = [x_{Ti}, y_{Ti}]$ – i точка из массива T_{tree} .

Вычислим массив дистанций D от каждой точки $N_{rand\ i1} \in A_{rand}$ до каждой точки $T_{i1} \in T_{tree}$ (3):

$$D = |N_{rand\ i1} - T_{i1}| \quad (3)$$

$$Dist = [D, id]$$

где id – номер соответствующей точки.

Из полученных значений $Dist$ и находим минимальное и присваиваем соответствующий id для ближайшей точки N_{near} (4):

$$N_{near\ i} = \min(Dist) \quad (4)$$

В результате получаем координаты $N_{near} = [x_{near}, y_{near}]$ и вычисляется перемещение точки N_{rand} на величину eps к точке N_{near} с учетом следующего условия (5):

$$T_{i1} = N_{near\ i} + (-1) * e * \frac{N_{near\ i} - N_{rand\ i1}}{Dist} \quad (5)$$

Полученные координаты точки $T(i)$ также являются новой точкой для расширения ветвей дерева $T_{i1} = N_{new}$. Для точки N_{new} рассчитаем дистанцию до всех остальных точек из массива T_{tree} (6):

$$D^* = |N_{new} - T_{i1}| \quad (6)$$

Для построения минимальной траектории пути в регионе рассчитанной точки N_{new} введем круглую область пространства G радиусом r с центром в точке N_{new} . Выберем массив точек N_{neigh} , которые удовлетворяют условию (7):

$$N_{neigh} = T_{tree\ i}, T_{tree\ i} \in G \quad (7)$$

Получив массив точек N_{neigh} определим общую стоимость перехода C_{base} между точками из массива N_{neigh} до точки финиша P_f как (8):

$$C_{base} = K + D^* \quad (8)$$

где K – количество переходов до точки N_{near} .

Полученный результат позволяет сформировать массив точек N_{par} , которые описывают вершины веток деревьев используемых в построении траектории в целом, на основе выбора минимальных значений из C_{base} (9):

$$N_{par} = \min(C_{base}) \quad (9)$$

После чего строится новая ветвь дерева T_{tree} от точки N_{new} к точке N_{par} .

Подробное описание разработанного алгоритма приводится в работах [18, 19].

Квази-случайный RRT* может быть более эффективным по сравнению с обычным методом RRT* при работе в условиях морской среды с течениями по нескольким причинам:

– равномерное исследование: Квази-случайная генерация точек, использующая квази-случайные последовательности, может обеспечить

более равномерное покрытие пространства состояний. В морской среде, где течения могут создавать сложные паттерны движения, равномерное исследование важно для обнаружения оптимальных путей и избегания потери роботами в локальных минимумах;

– адаптация к течениям: Квази-случайный метод может более гибко адаптироваться к изменяющимся условиям течений. Так как он использует некоторую степень случайности в генерации точек, он может легче исследовать новые области, в которых могут возникнуть сильные течения;

– расчёт течений в генерации точек: Квази-случайный метод позволяет учесть интенсивность и направленность течений в процессе генерации точек. Это может быть важным фактором при работе системы планирования в реальных условиях.

Интегрирование данных карты течений в систему планирования БЭС

Как показывает практика, недетерминированность морской среды и особенности функционирования в условиях течений и волнения, могут вносить существенные внешние возмущения, что приводит к потере сохранения передвижения вдоль целевой траектории. В виду чего, в данный алгоритм был расширен для учета таких параметров среды как интенсивность и направленность течений.

Учет морских условий и физических параметров среды в системе планирования перемещения группы МРТК может иметь несколько ключевых преимуществ:

– повышение эффективности миссии: Зная и учитывая текущие течения и другие факторы окружающей среды, можно планировать оптимальные маршруты перемещения для сбора данных или выполнения задачи. Это увеличивает шансы на успешное выполнение миссии и сокращает временные и энергетические затраты.

– качество собираемых данных: Точное знание параметров среды позволяет корректно интерпретировать и анализировать данные, собранные группой МРТК. Это существенно важно для научных исследований и мониторинга.

– оптимизация ресурсов: Учет окружающей среды помогает экономить энергетические ресурсы группы МРТК, что особенно важно для выполнения длительных миссий.

Значения интенсивности q и направленности ξ течения в каждой точке $\chi(q, \xi) \in W$, как отклонение от стандартного значения (к примеру, $Flow = 5$) в соответствии с выражением:

$$q_{j1} = Flow * (1 + \Delta Q), j = 1 \quad (10)$$

$$q_{j1} = q_{(j-1)1} * K_{int}, j = 2$$

где $\Delta Q = [-0.1...0.1]$ – коэффициент изменения интенсивности течения, $K_{int} = 0.3$ – коэффициент описывающий градиент изменения интенсивности течения от q_{11} к q_{j1} .

Таким образом массив значений интенсивности течений Q формируется на основе выражений (10) и может быть представлен в виде:

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & \dots & q_{j1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{1k} & \dots & q_{jk} \end{bmatrix} \quad (11)$$

где j – количество сплайнов определяющих цифровое поле течений, k – количество ключевых точек сплайнов P_{flow} . Следует учесть что $q_{jk} = const$ для всех значений $P_{flow}(j, k)$.

Направленность ξ течения в каждой точке $\chi(\varrho, \xi) \in W$ может быть описана следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_i + \Delta C_\xi, \\ \xi_i &= \text{atan}(\Delta y_i / \Delta x_i) \\ \Delta y_i &= y_i - y_{i-1} \\ \Delta x_i &= x_i - x_{i-1} \end{aligned} \quad (12)$$

где x_i, y_i – текущие точки в которых рассчитывается направленность течения, ΔC_ξ – коэффициент приращения направления течения зависящий от направленности в текущей и предыдущей точке, ΔC_ξ – случайная составляющая вносящая погрешность (недетерминированное воздействие/шум) в диапазоне $\Delta C_\xi = (-0.3 \dots 0.3)$.

Таким образом для любой произвольной точки P_{cur} на карте акватории могут быть рассчитаны параметры интенсивности и направленности с учетом выражений (12) и определения двух смежных точек χ_i и χ_{i-1} :

$$\begin{aligned} \xi_{P_{cur}} &= \frac{\xi_i - \xi_{i-1}}{2} \\ \varrho_{P_{cur}}(j, k) &= \frac{(q_{jk} - q_{jk-1})}{2} \end{aligned} \quad (13)$$

Квази-случайный RRT* может быть более эффективным по сравнению с обычным методом RRT* при работе в условиях морской среды с течениями по нескольким причинам:

- **Равномерное исследование:** Квази-случайная генерация точек, использующая квази-случайные последовательности, может обеспечить более равномерное покрытие пространства состояний. В морской среде, где течения могут создавать сложные паттерны движения, равномерное исследование важно для обнаружения оптимальных путей и избегания потери роботами в локальных минимумах.

- **Адаптация к течениям:** Квази-случайный метод может более гибко адаптироваться к изменяющимся условиям течений. Так как он использует некоторую степень случайности в генерации точек, он может легче исследовать новые области, в которых могут возникнуть сильные течения.

- **Учет течений в генерации точек:** Квази-случайный метод позволяет учесть интенсивность и направленность течений в процессе генерации точек. Это может быть важным фактором при работе системы планирования в реальных условиях.

Для учета интенсивности и направленности течения в алгоритме была модернизирована функция расчета стоимости (целевая функция), определяющая насколько хорошо конкретная вершина подходит для расширения дерева

$$C_{base}(N, N_{par}) = C_{base}(N, N_{par}) + w_\varrho * \varrho + w_\xi * \cos(\xi(N) - \beta_{par}) \quad (14)$$

Где $\varrho(N)$ – интенсивность течения в точке n , w_ϱ – весовой коэффициент для интенсивности течения, $\xi(N)$ – направленность течения в точке n , w_ξ – весовой коэффициент направленности течения, β_{par} направление из вершины n в вершину n_{par} .

Как видно из выражения (2) общая стоимость $C_{base}(N, N_{par})$ учитывает как интенсивность течения в точке N , так и угол между направлением течения и направлением движения от N_{par} к N . Весовые коэффициенты w_ξ и w_ϱ позволяют корректировать значения интенсивности и направленности в каждой точке области, в которой есть наблюдаемое течение (за основу берется карта течений акватории).

Пример работы алгоритма квази-случайных деревьев в недетерминированных условиях с течениями, совпадающими с направлением движения агента представлен на рис. 2.

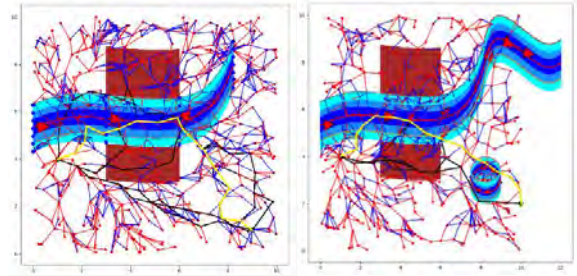


Рис. 2. Пример нахождения целевого пути системой планирования на основе квази-случайных деревьев в условиях течения совпадающего по направлению.

На рис. 2 представлены два случая, когда направление течений и направление планируемого движения группы в точку совпадают. Желтой линией выделена рассчитанная целевая Ψ_{tr} траектория. Как видно, часть пути проходит через область течения (узлы 1-5). На рис. 2 (справа) изображена ситуация, когда на пути целевой траектории есть область кругового течения, в данном случае планировщик проложил путь через зону с наилучшим весовым коэффициентом, где значение направленности течения совпало с направлением движения агента, тем самым обеспечив минимальную стоимость узла общего дерева.

Пример работы планировщика на карте с течением направления которого противоположно направлению движения агента представлен на рис. 3.

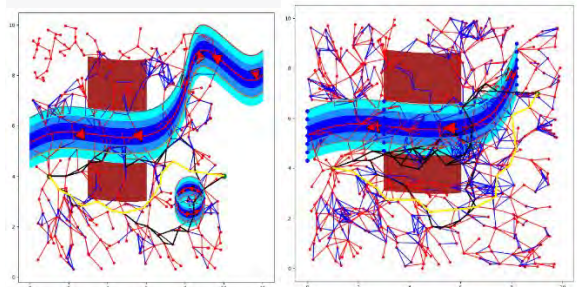


Рис. 3. Пример нахождения целевого пути системой планирования на основе квази-случайных деревьев в условиях течения не совпадающих по направлению.

Параметры направленности $\xi(N)$ и интенсивности $\varrho(N)$ также могут быть учтены и в иных алгоритмах планирования пути (таких как A^* , D^* и другие), однако учет переменных $\xi(N)$ и $\varrho(N)$ в составе алгоритма квази-рандомных деревьев имеет ряд преимуществ:

- Скорость и расширяемость: квази-RRT* изначально является методом для быстрого исследования пространства с целью поиска пути, что делает его расширяемым на большие пространства.
- Адаптивность к динамике: квази-RRT* способен адаптироваться к динамическим изменениям в среде, включая течения. Это может быть полезно в сценариях, где течения могут меняться со временем или в разных областях. D^* хотя и мог бы учитывать течения, обычно не так адаптивен к динамическим изменениям. Это важно в морской среде, где могут возникать изменения в течениях, погоде или наличии других судов. Алгоритм квази-RRT* может адаптироваться к таким изменениям и искать наилучший маршрут на основе текущих условий.
- Обработка сложных препятствий: квази-RRT* может лучше справляться с пространственными особенностями и сложными препятствиями, такими как узкие коридоры и области с острыми углами.
- Поддержка динамических ограничений: квази-RRT* может быть расширен для учета динамических ограничений на движение (например, ускорение, скорость), что позволяет учитывать физические ограничения робота или судна при планировании пути.

Заключение

В статье представлена интеграция разработанного модуля формирования течений в систему планирования перемещения судна. Этот усовершенствованный подход к навигационной технологии морских транспортных систем приносит множество преимуществ:

- интеграция модуля формирования течений позволяет системе планирования создавать более точные и надежные маршруты, основанные на реальных гидродинамических данных;
- модуль обеспечивает системе планирования возможность динамического реагирования на изменяющиеся условия, что существенно повышает адаптивность к изменениям гидрографической обстановки;
- интеграция модуля повышает безопасность движения в реальном времени в условиях ограниченного пространства, где такие условия как: течения, узкости, каналы и преграды могут представлять экстремальные эксплуатационные условия;
- позволяет оптимизировать использование энергии при планировании маршрутов, что снижает затраты и повышает устойчивость к эксплуатационным условиям.

Разработанный подход представляет собой важный шаг в развитии навигационных систем, предоставляя операторам и автономным судам современные средства для успешного и безопасного перемещения в разнообразных гидрологических сценариях.

Литература

1. Дмитриев, В.И. Методы обеспечения безопасности мореплавания при внедрении беспилотных технологий / В.И. Дмитриев, В.В. Каретников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2017. Т. 9, № 6. С. 1149–1158.
2. Акмайкин Д.А., Гамс А.В. Использование современных информационных систем автономного управления судами для практической подготовки судоводителей // Научные труды Дальрыбвтуза. 2021. Т. 57, № 3. С. 14–18.
3. Бабак Л.Н., Щербатюк А.Ф. Об одном алгоритме поиска источника подводного шлейфа, основанном на использовании группы АНПА // Управление большими системами. – 2010. – Вып. 30.1. – С. 536–548.
4. Волошин С.Б., Занин В.Ю. Маевский А.М. и др. Аспекты применения гетерогенных групп робототехнических комплексов повышенной автономности, в том числе из состава обсерваторий, с целью получения океанографических данных и их дальнейшего использования для освоения Арктической зоны // Сборник работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа 2020 года М. Министерство энергетики Российской Федерации, ООО «Технодевелоп», 2020, С.62-77.
5. Bechlioulis, C. P., Giagkas, F., Karras, G. C., and Kyriakopoulos, K. J. Robust Formation Control for Multiple Underwater Vehicles // Front. Robot. AI 6, 90. doi:10.3389/frobt.2019.00090
6. Filaretov, V., Yukhimets, D. The Method of Path Planning for Auv-Group Moving in Desired Formation in Unknown Environment with Obstacles // IFAC-PapersOnLine 53, 14650–14655. 21st IFAC World Congress. doi:10.1016/j.ifacol.2020.12.1475
7. Маевский А.М., Турсенев С.А., Смирнов А.С. Робототехника в мониторинге глубин, "Гражданская оборона" 2022, -С. 42-44
8. Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / В.Х. Пшихопов [и др.] // ФИЗМАТЛИТ. 2014. № 595.
9. Мартынова Л.А., Киселев Н.К., Мысливый А.А. Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Информационно-управляющие системы. 2020. №4, с.31-41. doi:10.31799/1684-8853-2020-4-31-41
10. Пшихопов В. Х. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах // Издательство: «Физматлит». 2015. 305 с.

11. Белоглазов Д.А., Гайдук А.Р., Косенко Е.Ю., Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х., Соловьев В.В., Титов А.Е., Финаев В.И., Шаповалов И.О. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Под ред. В.Х. Пшихопова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 305 с.
12. Ulun S, Unel M. Coordinated motion of UGVs and a UAV. InIndustrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE 2013 Nov 10 (pp. 4079-4084). IEEE.
13. А.М. Маевский, В.Ю. Занин, С.А. Турсенев Групповое применение подводных планеров в задаче мониторинга подводных потенциально-опасных объектов на примере ликвидации аварийных разливов нефти // Научно-аналитический журнал проблемы управления рисками в техносфере (Problems of technosphere risk management) № 3 (59) – 2021. – С. 20-28.
14. Маевский А.М., Турсенев С.А., Смирнов А.С. Применение гетерогенной группы морских робототехнических комплексов в качестве сетевых систем мониторинга подводных потенциально-опасных объектов и загрязнений на морской акватории материалы международной научно-практической конференции «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы мониторинг, предотвращение и ликвидация чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» 2021.–с 22-29
15. Будко П.А., Жуков Г.А. "Групповое использование робототехнических комплексов при выполнении миссий на глобальных удалениях от пункта управления" // Т-Comm - Телекоммуникации и Транспорт, vol. 11, no. 9, 2017, pp. 4-14.
16. Гайдук А.Р., Капустян С.Г., Шаповалов И.О. Алгоритм управления движением группы мобильных роботов в условиях неопределенности // Инженерный Вестник Дона. 2018. №3 (50). – С. 89-100.
17. Анализ и состояние аварийности. URL <https://sea.rostransnadzor.ru/funktsii/rassledovanietransportny-h-proissshes/analiz-i-sostoyanie-avarijnost> (дата обращения: 10.01.2024)
18. A.M Maevskiy, A.E Gorelyi and R.O Morozov, "Development of a Hybrid Method for Planning the Movement of a Group of Marine Robotic Complexes in a Priori Unknown Environment with Obstacles," 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 2021, pp. 461-466, doi: 10.1109/EDM52169.2021.9507660
19. Маевский А.М., Морозов Р.О., Рыжов В.А., Горелый А.Е. Разработка многоуровневой системы планирования траектории движения группы АНПА в неизвестной среде с препятствиями // Известия ЮФУ Технические науки № 1 (2021). -С. 30-47

References

1. Dmitriev, V.I. Metody obespecheniya bezopasnosti moreplavaniya pri vnedrenii bespilotnyh tekhnologij / V.I. Dmitriev, V.V. Karetnikov // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2017. T. 9, № 6. S. 1149–1158.
2. Akmajkin D.A., Gams A.V. Ispol'zovanie sovremennyh informacionnyh sistem av tonomnogo upravleniya sudami dlya prakticheskoy podgotovki sudovoditelej // Nauchnye tru dy Dal'rybvтуza. 2021. T. 57, № 3. S. 14–18.
3. Babak L.N., SHCHerbatiuk A.F. Ob odnom algoritme poiska istochnika podvodnogo shlejfa, osnovanom na ispol'zovanii gruppy ANPA // Upravlenie bol'shimi sistemami. – 2010. – Vyp. 30.1. – S. 536–548.
4. Voloshin S.B., Zанин V.YU. Maevskij A.M. i dr. Aspekty primeneniya geterogennyh grupp robototekhnicheskikh kompleksov povyshennoj avtonomnosti, v tom chisle iz sostava observatorij, s cel'yu polucheniya okeanograficheskikh dannyh i ih dal'nejshego ispol'zovaniya dlya osvoeniya Arkticheskoy zony // Sbornik rabot laureatov Mezhdunarodnogo konkursa nauchnyh, nauchno-tekhnicheskikh i innovacionnyh razrabotok, napravlennyh na razvitie i osvoenie Arktiki i kontinental'nogo shel'fa 2020 goda M. Ministerstvo energetiki Rossijskoj Federacii, OOO «Tekhnodelop», 2020, S.62-77.
5. Bechlioulis, C. P., Giagkas, F., Karras, G. C., and Kyriakopoulos, K. J. Robust Formation Control for Multiple Underwater Vehicles // Front. Robot. AI 6, 90. doi:10.3389/frobt.2019.00090
6. Filaretov, V., Yukhimets, D. The Method of Path Planning for Auv-Group Moving in Desired Formation in Unknown Environment with Obstacles // IFAC-PapersOnLine 53, 14650–14655. 21st IFAC World Congress. doi:10.1016/j.ifacol.2020.12.1475
7. Maevskij A.M., Tursenev S.A., Smirnov A.S. Robototekhnika v monitoringe glubin, "Grazhdanskaya oborona" 2022,-S. 42-44
8. Intellektual'noe planirovanie traektorij podvizhnyh ob"ektov v sredah s prepyatstviyami / V.H. Pshihopov [i dr.] // FIZMATLIT. 2014. № 595.
9. Martynova L.A., Kiselev N.K., Mysliviy A.A. Metod vybora arhitektury mul'tiagentnoj sistemy upravleniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata // Informacionno-upravlyayushchie sistemy. 2020. №4, s.31-41. doi:10.31799/1684-8853-2020-4-31-41
10. Pshihopov V. H. Gruppovoe upravlenie podvizhnymi ob"ektami v neopredelennyh sredah // Izdatel'stvo: «Fizmatlit». 2015. 305 s.
11. Beloglazov D.A., Gajduk A.R., Kosenko E.YU., Medvedev M.YU., Pshihopov V.H., Solov'ev V.V., Titov A.E., Finaev V.I., SHapovalov I.O. Gruppovoe upravlenie podvizhnymi ob"ektami v neopredelennyh sredah / Pod red. V.H. Pshihopova. – М.: FIZMATLIT, 2015. – 305 с.
12. Ulun S, Unel M. Coordinated motion of UGVs and a UAV. InIndustrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE 2013 Nov 10 (pp. 4079-4084). IEEE.
13. А.М. Маевский, В.Ю. Занин, С.А. Турсенев Групповое применение подводных планеров в задаче мониторинга подводных потенциал'но-опасных об"ектов на примере ликвидации аварийных разливов нефти // Научно-аналитический журнал проблемы управления рисками в техносфере (Problems of technosphere rismanagement) № 3 (59) – 2021. – С. 20-28.

14. Maevskij A.M., Tursenev S.A., Smirnov A.S. Primenenie geterogennoj gruppy morskikh robototekhnicheskikh kompleksov v kachestve setecentricheskikh sistem monitoringa podvodnykh potencial'no-opasnykh ob"ektov i zagryaznenij na morskoj akvatorii materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Servis bezopasnosti v Rossii: opyt, problemy, perspektivy monitoring, predotvrashchenie i likvidaciya chrezvychajnykh situacij prirodnogo i tekhnogenogo haraktera» 2021.–s 22-29
15. Budko P.A., ZHukov G.A. "Grupповое ispol'zovanie robototekhnicheskikh kompleksov pri vypolnenii missij na global'nyh udaleniyah ot punkta upravleniya" // T-Comm - Telekommunikacii i Transport, vol. 11, no. 9, 2017, pp. 4-14.
16. Gajduk A.R., Kapustyan S.G., SHapovalov I.O. Algoritm upravleniya dvizheniem gruppy mobil'nykh robotov v usloviyah neopredelennosti // Inzhenernyj Vestnik Dona. 2018. №3 (50). – S. 89-100.
17. Analiz i sostoyanie avarijnosti. URL <https://sea.rostransnadzor.ru/funktsii/rassledovanietransportnyh-proisshestv/analiz-i-sostoyanie-avarijnosti> (data obrashcheniya: 10.01.2024)
18. A.M Maevskiy, A.E Gorelyi and R.O Morozov, "Development of a Hybrid Method for Planning the Movement of a Group of Marine Robotic Complexes in a Priori Unknown Environment with Obstacles," 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 2021, pp. 461-466, doi: 10.1109/EDM52169.2021.9507660
19. Maevskij A.M., Morozov R.O., Ryzhov V.A., Gorelyj A.E. Razrabotka mnogourovnevoj sistemy planirovaniya traektorii dvizheniya gruppy ANPA v neizvestnoj srede s prepyatstviyami // Izvestiya YUFU Tekhnicheskie nauki № 1 (2021). -S. 30-47.

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

Маевский Андрей Михайлович, начальник отдела морской робототехники, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: maevskiy_andrey@mail.ru

Andrey M. Maevskiy, Head of marine Department St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: maevskiy_andrey@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 28.01.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 29.01.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 31.01.2024.

**ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ
СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**
**TECHNOLOGY OF SHIP BUILDING. SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF
SHIPBUILDING PRODUCTION**

Научная статья

УДК 621.7.08

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.008>

**Методика моделирования фаски отверстий в корпусах объектов подводного
кораблестроения под варку насыщения**

Часть 4 Экспериментальные исследования применимости методики

Русановский С.А.¹ s.rusanovskiy@narfu.ru, Худяков М.П.¹ m.khudyakov@narfu.ru,

Ковин П.С.² p.kovin@dassembly.ru

¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова,

²Цифровая сборка

Аннотация. В 4й части статьи рассмотрена экспериментальная проверка работоспособности и адекватности ранее рассмотренной методики моделирования разделок отверстий в цилиндрических и сферических объектах. Базой методики является геометрическое моделирование, которое естественным образом позволяет идентифицировать поверхность разделки. Для подтверждения предлагаемых математической и геометрической моделей была проведена экспериментальная проверка гипотезы о том, что предлагаемый комплекс решений по автоматизации вписывается в действующую технологию построения геометрии разделки кромок. Эксперимент состоял из двух частей: компьютерного и натурного. Это необходимо для валидации предлагаемого комплекса решений. В компьютерном эксперименте проверялось соответствие геометрической модели кромки отверстий, создаваемой по методике, рассмотренной в ранних частях, реальной геометрии отверстия по существующей технологии. В натурном эксперименте проверялась возможность обработки корпусных конструкций с применением автоматизированных технологических комплексов, выполненных на базе технологического робота.

Ключевые слова: системы автоматизированного проектирования, формообразование, методика, объекты подводного кораблестроения, прочный корпус, варка насыщения, кромка отверстия, линейчатая поверхность, технологические комплексы, CAD-модель, лазерный трекер.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10078.

Для цитирования: Русановский С.А., Худяков М.П., Ковин П.С. Методика моделирования фаски отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения под варку насыщения Часть 4 Экспериментальные исследования применимости методики, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 73—80. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.008

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.008>

**Modelling technique of the opening's bevel in underwater shipbuilding hulls
objects for welding flanges Part 4 Experimental research of the method
applicability**

Sergey A. Rusanovskiy¹ s.rusanovskiy@narfu.ru, Mikhail P. Khudyakov¹ m.khudyakov@narfu.ru,

Pavel S. Kavin² p.kovin@dassembly.ru

¹Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov», ²JSC «Digital Assembly»

Abstract. In the 4th part of the article, an experimental check of the operability and adequacy of the previously considered methodology for modeling the cutting of holes in cylindrical and spherical objects is considered. The method is based on geometric modeling, which naturally allows you to identify the preparation surface. To confirm the proposed mathematical and geometric models, an experimental test of the hypothesis was carried out that the proposed complex of automation solutions fits into the current technology of constructing edge preparation geometry. The experiment consisted of two parts: computer and nature. This is necessary for the validation of the proposed solution set. The computer experiment checked the correspondence of the geometric model of the edge of the holes, created according to the method considered in the early parts, of the real geometry of the hole using the existing technology. In a full-scale experiment, the possibility of processing body structures using automated technological complexes based on a technological robot was checked.

Key words: computer aided design systems, shaping, methodology, objects of underwater shipbuilding, pressure hull, welding of flanges, bevel of opening, ruled surface, technological complexes, CAD-model, laser tracker.

Financial Support: The study was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation

No. 23-29-10078.

For citation: Sergey A. Rusanovskiy, Mikhail P. Khudyakov, Pavel S. Kovin Modelling technique of the opening's bevel in underwater shipbuilding hulls objects for welding flanges Part 4 Experimental research of the method applicability, Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 73—80. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.008

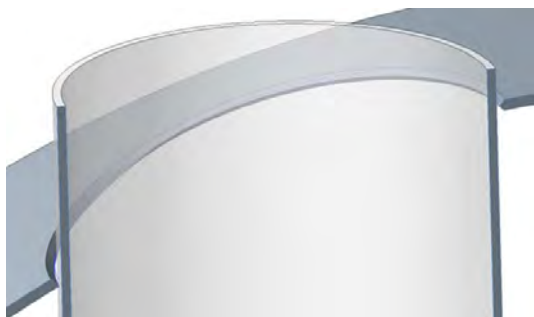
Введение

В предыдущих частях 1, 2 и 3 [1] цикла рассмотрены вопросы моделирования разделки кромок отверстий в корпусах подводных судов [2] при варке в них цилиндрического насыщения на основе описания кромок при помощи параметрических уравнений. При автоматизированной обработке кромок отверстий с помощью станков с ЧПУ особый интерес представляет формализация процесса моделирования операций по получению поверхности фаски разделки кромок при помощи стандартных операций, реализуемых в пакетах САПР [3]. Наличие таких процедур позволит создавать наиболее эффективные управляющие программы для обрабатывающих комплексов [4]. Целью проведения эксперимента является подтверждение работоспособности комплекса научно-технических решений, позволяющих обеспечить обработку кромок отверстий в специфических условиях судостроительного производства. Для проведения компьютерного эксперимента была рассмотрена кромка отверстия на цилиндрической обечайке (рисунок 1, б). Эта поверхность выбрана в качестве объекта вследствие своей сложности в процессе построения кромки по сечениям в конструкторской документации.

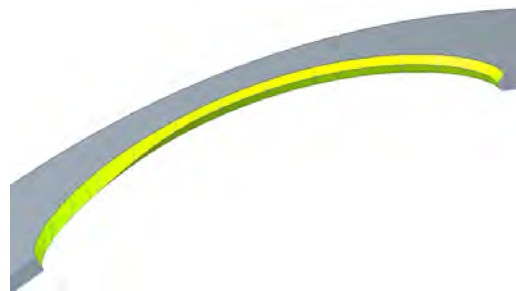
Для проведения натурного эксперимента была выбрана кромка отверстия на сферической обечайке, представленная на рисунке 2, вследствие труднодоступности отверстия для обработки с помощью различного технологического оборудования.

1. Методы и Материалы

Для проведения эксперимента в два этапа (компьютерный и натурный) были рассмотрены примеры типовых обрабатываемых поверхностей вырезов прочных конструкций объектов подводного кораблестроения, представленных на рисунках 1 и 2.



а)



б)

Рис. 1. Деталь (фланец) насыщения в цилиндрической части корпуса подводного аппарата (а) и поверхность разделки под его варку в корпус (б)

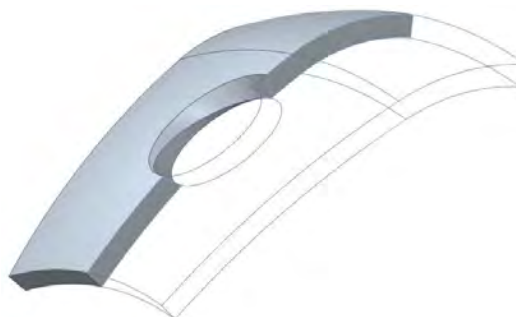


Рис. 2. Кромка отверстия на сферической обечайке

а) подготовка и проведение компьютерного эксперимента.

Основные гипотезы для проверки с помощью эксперимента:

- 1) соответствие геометрической модели кромки отверстий целям описания, входящей в комплекс предлагаемых научно-технических решений,
- 2) устойчивость геометрической модели при изменении размеров отдельных элементов в заданных пределах,
- 3) соответствие (валидация) координат геометрической и номинальной моделей.

В эксперименте определим геометрическую погрешность отклонения предлагаемой поверхности от номинальной геометрии. В качестве объекта выбрано отверстие в цилиндрической обечайке со сложными переходами, показанное на рисунке 1. Все построения выполнены в САПР PTC Creo (в ходе выполнения работы применялись разные версии от 2.0 до 7.0). На рисунке 3 показана поверхность, построенная по традиционной технологии с использованием большого количества сечений (показаны синим цветом). На рисунке 3.4 показана поверхность разделки, построенная по предлагаемой методике геометрического моделирования.



Рис. 3. Поверхность разделки под сварку, построенная по традиционной технологии



Рис.

4. Поверхность разделки под сварку, построенная по предлагаемой технологии

Была проверена устойчивость разработанного алгоритма варьированием параметров отверстий на обозначенных формах корпуса. Устойчивость модели для выбранного примера находится в диапазоне $\text{Dотв} < 0,2\text{Dобечайки}$, угол отклонения оси отверстия от вертикальной плоскости обечайки (ДП) – любой ($0^\circ \dots 180^\circ$).

б) подготовка и проведение натурного эксперимента.

Основные гипотезы (задачи) для проверки с помощью эксперимента:

1) возможность полностью «цифровой» подготовки обработки корпусных конструкций с применением автоматизированных технологических комплексов,

2) возможность выполнения обработки [5] технологическим роботом.

Эксперимент производился на базе ООО «Цифровая сборка» с использованием следующего оборудования:

Робот манипулятор KUKA KR270 (рисунок 5).

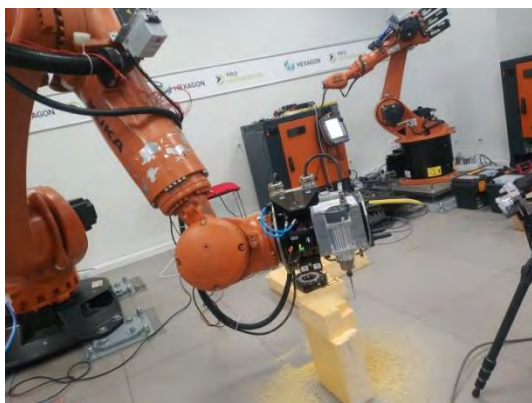


Рис. 5. Робот манипулятор KUKA KR270 при проведении эксперимента

Шпиндель: воздушного охлаждения Purelogic GMT GA0.8/220/24K-D65/ER11, обороты при обработке (постоянное значение): 20.000 оборотов/мин. Фреза: цилиндрическая $6 \times 52 \times 110$ мм. Измерительное устройство для онлайн коррективы: Leica Tracker AT960. Визирная цель

T-MAC-F (+6DoF), позволяющая выполнять измерения положения (XYZ) и ориентации инструмента (углы Эйлера ABC). Измерения готового образца проводились с помощью измерительной руки HEXAGON Absolute Arm с установленным сканером RS6. Материал модели: экструдированный пенополистирол.

Для моделирования процесса обработки составлена схема произвольного размещения робота на поверхности сферы глубоководного аппарата, показанная на рисунке 6.

Вид закрепления любого нестационарного технологического комплекса НТК [4] (в рассматриваемом случае робота-манипулятора) в эксперименте не рассматривается и считается априори нежестким податливым раскреплением [6].

Обрабатываемая поверхность (в рассматриваемом варианте – фаска отверстия) может располагаться полностью или частично в рабочей зоне НТК. При неполном охвате рабочей зоны НТК его необходимо перенести и заново привязать к глобальной системе координат изделия [7].

Для выполнения эксперимента выбрана небольшая зона, указанная на рисунке 7. Данный участок обработки позволяет полностью верифицировать и валидировать модель, схему обработки и получаемые результаты [8]. В длине участка обработки должны находиться минимум два сечения, предусмотренные нормативной документацией. Это необходимо для последующего сравнения 3D модели и действительной поверхности (верификация), нормативной и действительной геометрии (валидация).

Выбор конкретного фрагмента обрабатываемой поверхности определялся по самому неблагоприятному сочетанию факторов. В частности, максимальное расстояние от базы НТК и максимальное сечение срезаемого слоя приводит к наибольшей податливости НТК, и, как следствие, - максимальные отклонения инструмента по смещению и углу наклона.

Программа обработки была написана в ПО SprutCAM 14 Robot. Интересующие стороны – верхняя и фронтальная – были обработаны на чистовом режиме.



Рис. 6. Размещение обрабатывающего центра на объекте

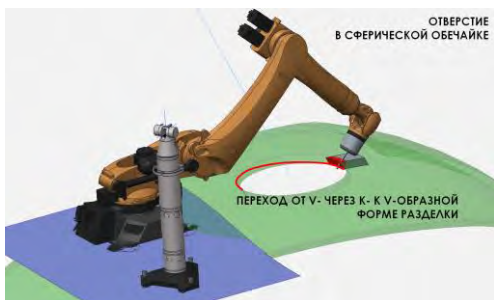


Рис. 7. Робот и заготовка для обработки

Для проведения экспериментов по фрезерованию был выбран режим обработки, приведенный на рисунке 8. Выбрано встречно-попутное фрезерование боковой поверхностью цилиндрической фрезы по методу касания. Использована профильная схема срезания припуска. В качестве траекторий движения инструмента использована последовательная схема. Вопрос измерения силовых параметров резания не рассматривался при выполнении эксперимента.

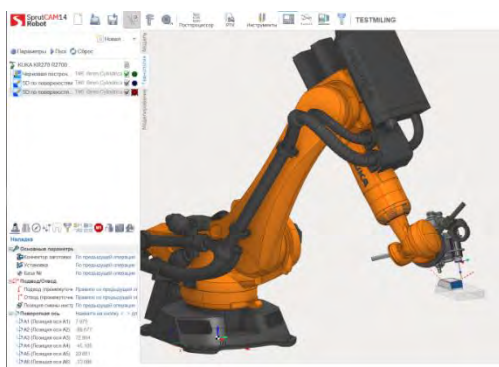


Рис. 8. Режимы в ПО SprutCAM14 Robot для обработки заготовки

Результат обработки модели представлен на рисунке 9.



Рис. 9. Обработанный образец

2. Результаты

а) результаты компьютерного эксперимента.

Для сравнения поверхностей было использовано ПО GeoMagic Design X, в котором в качестве эталона использована поверхность, построенная по традиционной технологии. Был использован метод сравнения по точкам поверхности с шагом 0,1 мм. Результат сравнения представлен на рисунке 10.



Рис. 10. Погрешность сравнения двух поверхностей. На диаграмме вертикальная ось показывает количество точек сравнения по поверхности

б) результаты натурного эксперимента.

При высокой точности обработки модели была невозможна обработка боком фрезы вследствие неполного совпадения алгоритма создания геометрии разделки и принципов стратегии обработки, используемых для опыта в ПО SprutCAM14 Robot – разрывы траектории обработки показаны на рисунке 11.

Точность эмпирическим путём снижалась для получения необходимого результата. В результате был получен удовлетворяющий результат по программе обработки по точности обработки в 0,26мм, при требуемой точности обработки согласно нормативной документации ± 2 мм.

После выполнения обработки был проведен обмер детали [9] с помощью измерительной руки HEXAGON Absolute Arm с установленным сканером RS6. Т.к. первый и второй образцы выполнены из экструдированного пенополистирола, использовался бесконтактный метод обмера.

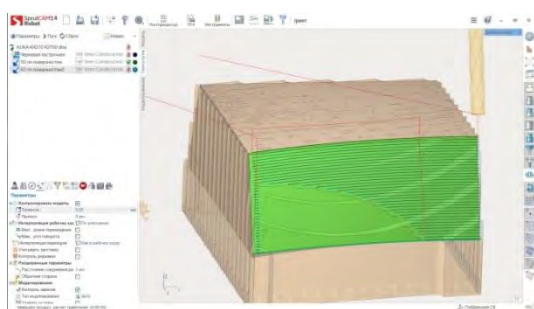


Рис. 11. Разрыв в траекториях при создании процесса обработки

Цифровая модель первого образца представлена на рисунке 12, второго образца – на рисунке 13.

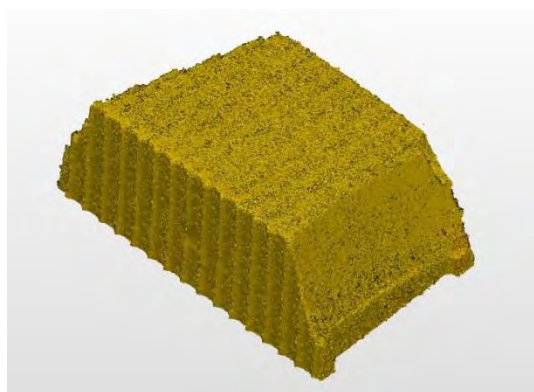


Рис. 12. Скан первого образца

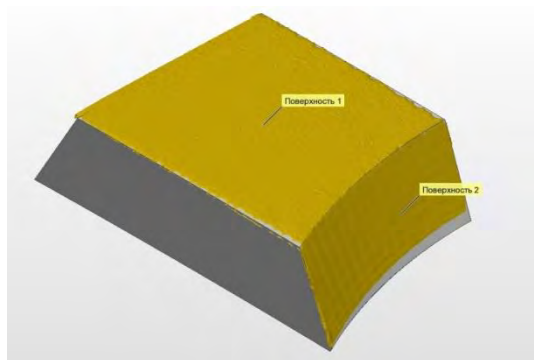


Рис. 13. Скан второго образца

Для сравнения поверхностей было использовано ПО PolyWorks Inspector, в котором в качестве эталона использована CAD-модель. Был использован метод сравнения по сетке точек. Результат измерений для первого образца представлен на рисунке 14, второго образца – на рисунке 15.

3. Обсуждение**а) анализ результатов компьютерного эксперимента.**

Наибольшие значения отклонений достигают 1,18 мм и характерны для области перехода из V-образной фаски в К-образную. Средние значения отклонений – 0,2...0,3 мм.

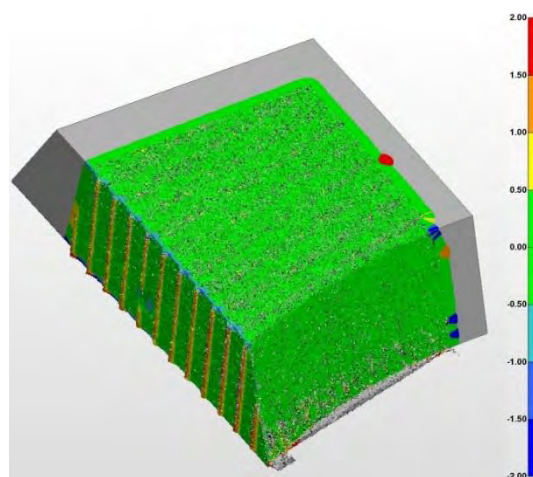


Рис. 14. Результаты измерения первого образца

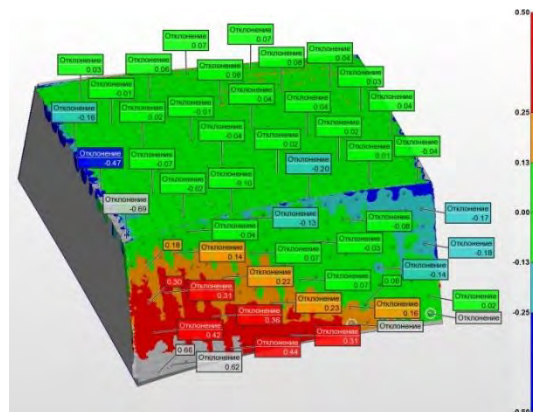


Рис. 15. Результаты измерения второго образца

Выполненный анализ результатов показал следующее:

- построения плазовых эскизов неоднозначны и недостаточно точны (1 мм) для формирования гладкой номинальной поверхности [10];
- наблюдается неполное соответствие проекции линии гребешка и сплайна S1 [1], по которому строится линейчатая поверхность;
- относительно большая погрешность на участке аппроксимации объясняется минимальным числом сегментов аппроксимирующей кривой; использование большего числа сегментов, вероятно, уменьшит погрешность.

Анализ гладкости номинальной поверхности показал, что большие отклонения проявляются на участках с большими скачками кривизны

номинальной поверхности, построенной по сечениям. Визуальное отображение кривизны поверхности по традиционной технологии представлено на рисунке 11.

Из результатов анализа видна принципиальная невозможность автоматизации подготовки плазовой документации по существующей технологии. Плоские сечения разделки задаются в плоскостях, проходящих через ось отверстия. Ввиду отсутствия

однозначного алгоритма построения поверхности фаски по сечениям неизбежно возникают ее отклонения от аналитически заданной. Для области перехода фаски из V-образной в К-образную прослеживается непостоянство значений угла фаски, нехарактерное для остальных сечений, что также привело к большим значениям отмеченных выше отклонений.

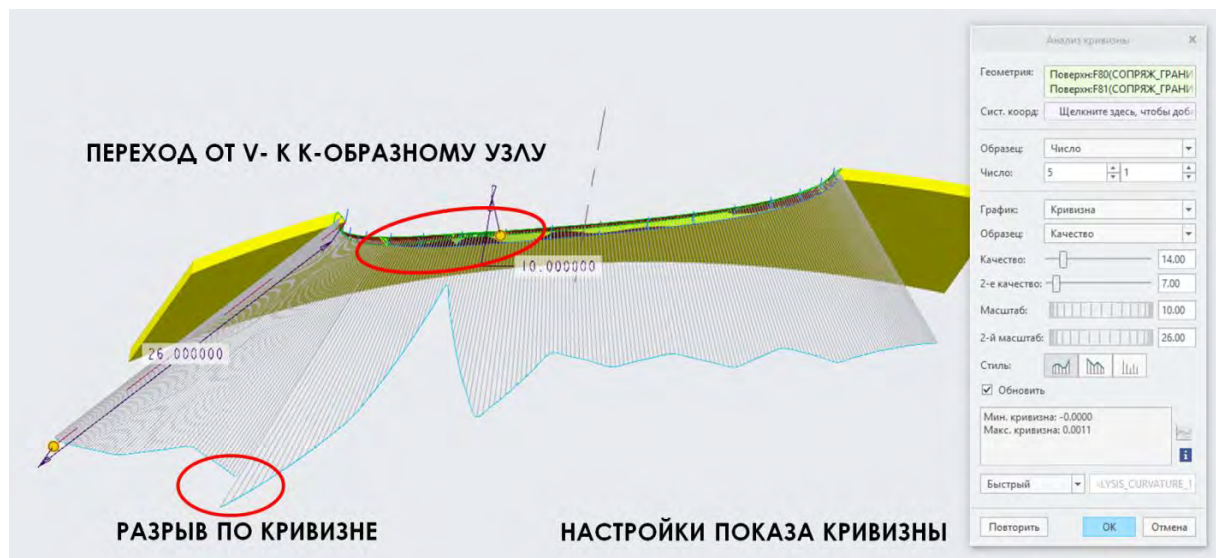


Рис. 11. Кривизна поверхности фаски по традиционной технологии.

Вместе с тем, проверка соответствия координат геометрической и математической моделей в отдельных зонах поверхности разделки показала, что при действующих требованиях производства к точности выполняемой разделки допустимо использовать предлагаемый вариант описания поверхности разделки.

б) анализ результатов натурного эксперимента.

Максимальные отклонения для первого образца за исключением вырывов по краю модели составили $\pm 0,6$ мм.

Максимальные отклонения для второго образца составили $(-0,20; +0,62)$ мм.

После анализа результатов измерений были проведены расчеты нормального распределения полученных отклонений [11]. При анализе первого образца было получено 427 значений отклонений. Значения были разбиты на 20 диапазонов, 5 из которых описывают 404 значения. При анализе второго образца было получено 155 значений. Значения отклонений были разбиты на 8 диапазонов.

Среднее арифметическое отклонение для первого образца составило $-0,004$ мм, для второго $-0,12$ мм.

Среднеквадратичное отклонение для первого образца составило $-0,12$ мм, для второго $-0,21$ мм.

Допустимые отклонения по полю допуска для рассматриваемой конструкции, как указано выше, составляют ± 2 мм.

Относительно большие по меркам общего машиностроения значения погрешностей вызваны неоптимальностью стандартных стратегий обработки, применяемых для специфических задач,

в которых способ обработки должен находиться в соответствии с другими параметрами технологического комплекса.

Заключение

Результаты экспериментов в целом подтвердили применимость предлагаемой методики [1], а также показали, что:

- действительная поверхность после обработки совпадает с заданной геометрической моделью в пределах нормативного значения допуска;
- действительная поверхность после обработки соответствует требованиям нормативной документации в рамках и с учетом ограничений выполненного компьютерного эксперимента;
- для специфических задач, в которых стратегия обработки комплексно связана с другими параметрами технологического комплекса, стандартные стратегии CAM-программ неоптимальны;
- управление динамическими погрешностями обработки с помощью НТК на базе промышленного робота эффективно реализуется путем применения в качестве элемента НТК высокоточных измерительных средств, таких как лазерные трекеры и сканеры с соответствующим программным обеспечением.

Повышение точности обработки можно добиться за счет включения в состав математической модели НТК погрешностей его элементов в параметрическом виде.

По итогам обобщения результатов проведенного исследования были составлены рекомендации по осуществлению механической обработки кромок отверстий [4]. В частности, были обоснованы

варианты способа обработки, метода формообразования, схемы срезания припуска для нестационарного обрабатывающего комплекса [12].

Работа выполнялась при поддержке гранта РНФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами»

(региональный конкурс Архангельской области) № 23-29-10078 «Создание научно-технологических основ проектирования нестационарных технологических комплексов для механической обработки корпусных конструкций глубоководных аппаратов на предприятиях Северодвинского судостроительного кластера».

Литература

1. Русановский С.А. Методика моделирования фаски отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения под варку насыщения Часть 3 Применение твердотельного моделирования для получения кромок отверстий в сферических участках корпусов / Русановский С.А. // Морские интеллектуальные технологии, — 2021. — №2 (53). — том 1. — С. 48-53. DOI:10.37220/MIT.2021.52.2.021
2. Русановский С. А. Моделирование формообразования кромок отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения / С. А. Русановский, М. П. Худяков, Н. И. Черенков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 993–1003. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-993-1003.
3. Веселков В. В. Принципы реализации и развития технологии автоматизированного изготовления корпусных конструкций / В.В. Веселков, М.А. Кобец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — №1(29). — С. 82-89.
4. Sergey A. Rusanovskiy. Design of Production Systems. Part 1. Development of the Design Procedure / Sergey A. Rusanovskiy, Mikhail P. Khudyakov and Yuri V. Klimov // Russian Engineering Research, — 2020, — Vol. 40, — No. 10, — pp. 815–818. DOI: 10.3103/S1068798X20100226.
5. Lenarčič, J. Advances in Robot Kinematics: Analysis and Design / Jadran Lenarčič, Philippe Wenger. – Springer Science+Business Media B.V. — 2008. — p. 472. — (eBook) ISBN 978-1-4020-8600-7.
6. Bolivar, N. Construction Robotics / Nelson Bolivar. – Arcler Press, Canada, — 2010. — p. 280.
7. Kurdila, A. J. Dynamics and Control of Robotic Systems / Andrew J. Kurdila, Pinhas Ben – Tzvi // Virginia Tech Virginia USA, — 2020. — p. 517.
8. Бронский, А.И. Техничко-экономические предпосылки назначения допусков на изготовление корпусных конструкций / А.И. Бронский, М.К. Глозман // Технология судостроения, — 1972. — № 10. — С. 10 – 14.
9. Средства контроля поверхностей сложной формы // Главный механик. — 2006. — № 8. — С. 29 – 32.
10. Куклин, О. С. Влияние точности изготовления деталей на пригоночные работы при сборке корпусных конструкций. О. С. Куклин, И. Г. Ширшов, И. Н. Стогов, Л.: ЦНИИ «Румб». — 1979. — 112 с.
11. Ефимова, М. Р. Практикум по общей теории статистики / М. Р. Ефимова, О. И. Ганченко, Е. В. Петрова. — Изд. 2 – е, перераб. и доп. — М.: Финансы и статистика, 2006. — С. 334.
12. Sergey A. Rusanovskiy. Design of Production Systems. Part 2. Nonstationary Systems / Sergey A. Rusanovskiy, Mikhail P. Khudyakov // Russian Engineering Research, — 2020, — Vol. 40, — No. 11, — pp. 901–904. DOI: 10.3103/S1068798X20110167.

References

1. Sergey A. Rusanovskiy, Mikhail P. Khudyakov, Nikolai I. Cherenkov. Metodika modelirovaniya faski otverstij v korpusah ob#ektov podvodnogo korablestroenija pod vvaruku nasyshhenija [Modelling technique of the opening's bevel in underwater shipbuilding hulls objects for welding flanges]. Marine intellectual technologies, No 1 part 1, (2020): 28-37. DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.006.
2. Sergey A. Rusanovskiy, Mikhail P. Khudyakov, and Nikolai I. Cherenkov. Modelirovanie formoobrazovaniya kromok otverstij v korpusah ob#ektov podvodnogo korablestroenija [Modeling of edges of openings in cases of objects of underwater shipbuilding]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova 10.5 (2018): 993–1003. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-993-1003.
3. Vjacheslav V. Veselkov. Principy realizacii i razvitiya tehnologii avtomatizirovannogo izgotovlenija korpusnykh konstrukcij [Principles of Implementation and Development of Automated Manufacturing Technology of Housing Structures]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. No 1(29) (2015): 82-89.
4. Sergey A. Rusanovskiy. Design of Production Systems. Part 1. Development of the Design Procedure / Sergey A. Rusanovskiy, Mikhail P. Khudyakov and Yuri V. Klimov. Russian Engineering Research, Vol. 40, No. 10 (2020): 815–818. DOI: 10.3103/S1068798X20100226.
5. Lenarčič, J. Advances in Robot Kinematics: Analysis and Design. Jadran Lenarčič, Philippe Wenger. Springer Science+Business Media B.V. 2008. p. 472. (eBook) ISBN 978-1-4020-8600-7.
6. Bolivar, N. Construction Robotics. Nelson Bolivar. Arcler Press, Canada, 2010. p. 280.
7. Kurdila, A. J. Dynamics and Control of Robotic Systems. Andrew J. Kurdila, Pinhas Ben – Tzvi. Virginia Tech Virginia USA, 2020. p. 517.
8. Bronskiy, A.I. Tekhniko-ekonomicheskie predposylki naznacheniya dopuskov na izgotovlenie korpusnykh konstruktsiy [Technical and economic prerequisites for the assignment of tolerances for the manufacture of hull structures]. A.I. Bronskiy, M.K. Glozman. Tekhnologiya sudostroeniya, No 10 (1972): 10-14.
9. Sredstva kontrolja poverhnostej slozhnoj formy [Complex Surface Controls]. Glavnyj mehanik, No 8 (2006): 29-32.
10. Kuklin, O. S. Vliyanie tochnosti izgotovleniya detalej na prigonochnye raboty pri sborke korpusnykh konstruktsiy [Influence of manufacturing accuracy of parts on fitting works during assembly of body structures]. O. S. Kuklin, I. G. Shirshov, I. N. Stogov, L.: TsNII «Rumb», 1979. p. 112.

11. Efimova, M. R. Praktikum po obshchey teorii statistiki [Workshop on the general theory of statistics]. M. R. Efimova, O. I. Ganchenko, E. V. Petrova. Moscow: Finansy i statistika, 2006. p. 334.
12. Sergey A. Rusanovskiy. Design of Production Systems. Part 2. Nonstationary Systems. Sergey A. Rusanovskiy, Mikhail P. Khudyakov. Russian Engineering Research, Vol. 40, No. 11 (2020): pp. 901–904. DOI: 10.3103/S1068798X20110167.

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

Русановский Сергей Александрович кандидат технических наук, доцент кафедры кораблестроения Филиал ФГАУ ВО «Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова» в г. Северодвинске, 164500, Российская Федерация, г. Северодвинск, ул. Воронина, 6 e-mail: s.rusanovskiy@narfu.ru

Худяков Михаил Павлович кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии металлов и машиностроения, Филиал ФГАУ ВО «Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова» в г. Северодвинске, 164500, Российская Федерация, г. Северодвинск, ул. Воронина, 6, e-mail: m.khudyakov@narfu.ru

Ковин Павел Сергеевич, Технический директор, АО «Цифровая сборка», г. Санкт-Петербург, наб. Реки Карповки, д.5, корп. 22, литер А e-mail: p.kovin@dasassembly.ru

Sergey A. Rusanovskiy Ph.D. (Eng), The associate professor of department of shipbuilding, Branch of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov» in Severodvinsk, 6 Voronina Str., Severodvinsk, 164500, Russian Federation, e-mail: s.rusanovskiy@narfu.ru

Mikhail P. Khudyakov The associate professor, Ph.D. (Eng), The associate professor of department of technology of metals and mechanical engineering, Branch of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov» in Severodvinsk, 6 Voronina Str., Severodvinsk, 164500, Russian Federation, e-mail: m.khudyakov@narfu.ru

Pavel S. Kovin, CTO, JSC Digital Assembly, 5 block 22, Karpovka river embankment, Saint-Petersburg, 197022, Russian Federation e-mail: p.kovin@dasassembly.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 03.10.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.01.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 30.01.2024.

Научная статья

УДК 532.013

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.009>**Согласование параметров воздухоподводящего рукава с характеристиками привода пневмомашин**Кузнецов Ю.П.¹ inturbo@yandex.ru, Чуваков А.Б.¹ tchouvakov@mail.ru, Погодин Р.А.¹ rpogodin@yandex.ru,
Хрунков С.Н.¹ khrunkov@nntu.ru, Крайнов А.А.¹ art.kr-91@mail.ru.¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В процессе эксплуатации пневмомашин нередко применяют рукава с параметрами, существенно отличающимися от рекомендованных, что негативно сказывается на эффективных характеристиках пневмопривода. В настоящей статье предлагается методика выбора параметров воздухоподводящего рукава, обеспечивающих эффективную работу пневмомашин. Обоснована замена трансцендентного уравнения одномерного адиабатического течения газа с трением в цилиндрической трубе на алгебраическое с минимальной погрешностью. С использованием данной методики доказано, что величина коэффициента сохранения полного давления полностью определяется располагаемым перепадом давлений и не зависит от длины и диаметра рукава. Была определена величина максимальной располагаемой мощности потока для любого сочетания расхода, длины и диаметра рукава. В результате, разработана номограмма для определения величины минимального диаметра рукава $d_{\min}$ при котором обеспечивается заданная мощность привода. Доказано, что для достижения максимальной мощности привода должна быть затрачена строго определенная доля располагаемой мощности потока, при этом коэффициент сохранения полного давления, давление перед приводом и располагаемый перепад энтальпий не зависят от параметров рукава и определяются только величиной располагаемого перепада давлений.

Ключевые слова: приведенная длина, воздухоподводящий рукав, ручная пневматическая машина, внутренний диаметр

Для цитирования: Кузнецов Ю.П., Чуваков А.Б., Погодин Р.А., Хрунков С.Н., Крайнов А.А.. Согласование параметров воздухоподводящего рукава с характеристиками привода пневмомашин. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 81—88. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.009

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.009>**Matching the parameters of the air supply hose with the characteristics of the pneumatic machine drive**Yuri P. Kuznetsov¹ inturbo@yandex.ru, Alexander B. Tchouvakov¹ tchouvakov@mail.ru,
Roman A. Pogodin¹ rpogodin@yandex.ru, Sergey N. Khrunkov¹ khrunkov@nntu.ru,
Artem A. Kraynov¹ art.kr-91@mail.ru¹Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Russian Federation

Abstract. During the operation of a pneumatic machine, hoses with parameters significantly different from those recommended are often used, which negatively affects the effective characteristics of the pneumatic drive. This article proposes a method for selecting the parameters of the air supply hose that ensure the efficient operation of the pneumatic machine. The replacement of the transcendental equation of a one-dimensional adiabatic gas flow with friction in a cylindrical pipe by an algebraic one with a minimum error is substantiated. Using this technique, it is proved that the value of the coefficient of conservation of total pressure is completely determined by the available pressure drop and does not depend on the length and diameter of the sleeve. The value of the maximum available flow power for any combination of flow rate, length and diameter of the sleeve was determined. As a result, a nomogram has been developed to determine the exact size of the $d_{\min}$, in which the specified drive speed is monitored. It is proved that in order to achieve the maximum drive power, a strictly defined proportion of the available flow power must be spent, while the coefficient of conservation of the total pressure, the pressure in front of the drive and the available enthalpy drop do not depend on the parameters of the sleeve and are determined only by the value of the available pressure drop.

Keywords: reduced length, air supply hose, manual pneumatic machine, inner diameter

For citation: Yuri P. Kuznetsov, Alexander B. Tchouvakov, Roman A. Pogodin, Sergey N. Khrunkov, Artem A. Kraynov, Matching the parameters of the air supply hose with the characteristics of the pneumatic machine drive, Marine intellectual technologies, 2024. № 1 part 1, P. 81—88. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.009

Введение

Ручные пневматические машины широко применяются в судостроительной промышленности

для выполнения различных технологических операций, в основном, при обработке металлоконструкций [1]. В каталогах [2,3,4,5,6] и паспортах машин устанавливается величина

внутреннего диаметра воздухоподводящего рукава, но, как правило, без указания его длины. По умолчанию подразумевается длина рукава 3...5 м согласно требованиям ГОСТ 12633-90 «Машины ручные пневматические вращательного действия» [7]. В то же время, в процессе эксплуатации машин нередко применяют рукава с параметрами, существенно отличающимися от рекомендованных паспортом: во-первых, часто используют значительно более длинные рукава, при этом их диаметр обычно остается неизменным. Во-вторых, применяя подводящие рукава с уменьшенным внутренним диаметром с целью уменьшения их жесткости. В обоих случаях увеличивается падение давления сжатого воздуха в рукаве, а мощность машины снижается. Как следствие, производительность пневматических машин при выполнении технологических операций может существенно уменьшаться, а общий расход сжатого воздуха, затрачиваемый на выполнение этих операций увеличивается.

Парк пневмомашин в нашей стране исчисляется сотнями тысяч штук, поэтому нерациональный выбор длины и диаметра воздухоподводящего рукава может приводить к существенным экономическим издержкам при их эксплуатации. Соответственно, разработка методики определения параметров воздухоподводящего рукава, обеспечивающих эффективную работу машины, является актуальной научно-практической задачей.

Рассмотрим последовательно решение задачи рационального выбора параметров воздухоподводящего рукава для обоих случаев отклонения параметров от паспортных рекомендаций.

Номограмма определения параметров воздухоподводящего рукава, обеспечивающих заданную величину падения давления в рукаве

Принципиальная схема системы, подающей сжатый воздух от компрессора к пневматической машине, приведена на рисунке 1.

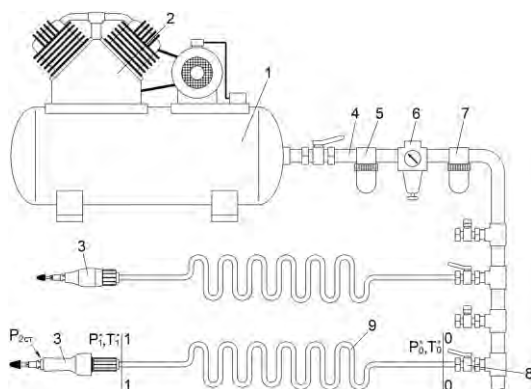


Рис. 1. Принципиальная схема системы подачи сжатого воздуха к пневматическим машинам

1 – ресивер; 2 – компрессор; 3 – пневматическая машина; 4 – магистральный трубопровод; 5 – фильтр-влагодотделитель; 6 – регулятор давления; 7 – лубрикатор; 8 – запорный кран; 9 – воздухоподводящий рукав; 0-0 – входное сечение воздухоподводящего рукава; 1-1 – выходное сечение воздухоподводящего рукава

Сжатый воздух от ресивера 1 компрессора 2, поступает к пневматической машине 3 через магистральный трубопровод 4, фильтр 5, регулятор давления 6, лубрикатор 7, запорный кран 8 и воздухоподводящий рукав 9.

Для определения величины падения давления в воздухоподводящем рукаве $\Delta P_{0-1}^* = P_0^* - P_1^*$ используем уравнение одномерного адиабатного течения газа с трением в цилиндрической трубе [8]:

$$\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_1^2} + \ln \frac{\lambda_0^2}{\lambda_1^2} = \chi = \frac{2k}{k+1} \zeta \frac{l}{d}, \quad (1)$$

где k - показатель адиабаты; ζ - коэффициент гидравлического сопротивления трубы; l, d - длина и внутренний диаметр трубы; $\lambda = \frac{c}{a^*}$ - безразмерная

скорость потока; c - скорость потока; a^* - критическая скорость.

В уравнении (1) параметры потока с индексом «0» относятся к входному сечению 0-0 воздухоподводящего рукава, параметры с индексом «1» - к его выходному сечению 1-1 (рис.1). Безразмерный параметр χ называют «приведенной длиной» трубы, которая интегрально выражает гидравлические характеристики воздухоподводящего рукава. Для удобства расчетов допустимо все местные сопротивления выразить через эквивалентную длину трубы, сопротивление трения которой равно сумме всех местных

сопротивлений: $\chi_{\text{экв}} = \frac{2k}{k+1} \cdot \sum \zeta_{\text{мест}}$.

Уравнение (1) трансцендентное, численные расчеты с его использованием являются весьма трудоемкими. Выполним его преобразование для получения простого аналитического решения. Численные расчеты [9] показали, что для подводящих рукавов пневматических машин практическая область изменения параметров χ , λ

и $\frac{\lambda_0}{\lambda_1}$ находится в границах: $\chi > 20$; $\lambda < 0,4$ и

$0,5 \leq \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \leq 0,95$. Соответственно, величина члена

$\ln \frac{\lambda_0^2}{\lambda_1^2}$ в уравнении (1) находится в пределах:

$-0,7 \leq \ln \frac{\lambda_0^2}{\lambda_1^2} \leq -0,2$. Поскольку величина

приведенной длины трубы χ на порядок и более превышает величину $\ln \frac{\lambda_0^2}{\lambda_1^2}$, то в указанных

пределах изменения параметров этим членом уравнения (1) в численных расчетах допустимо пренебречь. Тогда уравнение (1) примет следующий вид:

$$\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_1^2} \approx \chi \quad (2)$$

Падение давления на участке рукава 0-1 можно также выразить с применением коэффициента

сохранения полного давления: $\sigma = \frac{P_1^*}{P_0^*} = \frac{q(\lambda_0)}{q(\lambda_1)}$,

$$\text{где } q(\lambda) = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}$$

- газодинамическая функция приведенного расхода.

Связь между σ и ΔP_{0-1}^* выражается уравнением:

$$\sigma = \frac{P_1^*}{P_0^*} = \frac{P_0^* - \Delta P_{0-1}^*}{P_0^*}.$$

В области $\lambda < 0,4$ функция $q(\lambda)$ изменяется практически линейно от λ , поэтому с погрешностью, не превышающей 3% можно принять:

$$q(\lambda) \approx \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda \quad (3)$$

Тогда, с учетом допущения (3) получим:

$$\sigma = \frac{P_1^*}{P_0^*} \approx \frac{\lambda_0}{\lambda_1}. \quad (4)$$

Умножим обе части уравнения (2) на λ_0^2 и тогда, с учетом (4), уравнение (2) примет вид:
или

$$\lambda_0 = \chi^{-0,5} (1 - \sigma^2)^{0,5} \quad (5)$$

Таким образом, в результате проведенных преобразований трансцендентное уравнение (1) удалось, с незначительной погрешностью заменить алгебраическим уравнением (5), связывающим

безразмерную скорость на входе в рукав λ_0 с коэффициентом сохранения давления σ и приведенной длиной трубы χ , что позволяет при заданной величине σ определить расход воздуха в трубе для любого сочетания ее длины и диаметра.

Для практического использования методики расчета параметров рукава целесообразно представить номограммой, связывающей длину и диаметр рукава с расходом сжатого воздуха при условии неизменности заданной величины падения давления воздуха в рукаве.

Параметры расчета номограммы: давление и температура воздуха на входе в рукав $P_0^* = 0,63 \text{ МПа}$; $T_0^* = 293 \text{ К}$. Располагаемый

$$\text{перепад давлений } \Pi = \frac{P_{2cm}}{P_0^*} = \frac{0,102}{0,63} = 0,16.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления рукава $\zeta = 0,05$. Сумма коэффициентов местных

сопротивлений $\sum \zeta_{\text{мест}} = 5$. Допустимая величина

падения давления на участке рукава 0-1 $P_{0-1}^* = 0,063 \text{ МПа}$, что соответствует $\sigma = 0,9$.

Давление воздуха и располагаемый перепад энтальпий в выходном сечении 1-1:

$$P_1^* = P_0^* \sigma = 0,567 \text{ МПа} \quad \text{и}$$

$$H = C_p T_0^* \left[1 - \left(\frac{P_1^*}{P_0^*} \right) \right] \frac{P_1^*}{P_0^*} = \frac{P_0^* - \Delta P_{0-1}^*}{P_0^*}$$

$$H = C_p T_0^* \left[1 - \left(\frac{\Pi}{\sigma} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = 113958 \text{ Дж/кг}$$

Номограмма представлена на рис.2.

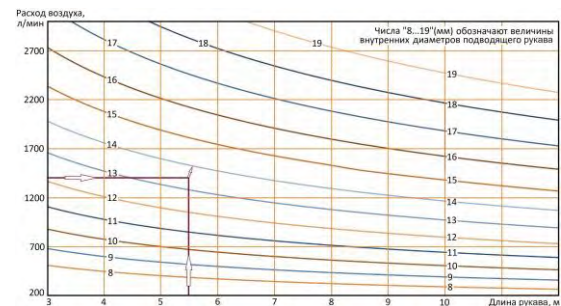


Рис.2. Номограмма для определения длины и диаметра воздухоподводящего рукава

Приведем пример использования номограммы. Пусть требуется определить внутренний диаметр рукава длиной 5,5 м, обеспечивающего работу машины при расходе воздуха 1400 л/мин. Искомый диаметр рукава определяет ближайшая линия номограммы, лежащая выше точки пересечения линий указанных параметров (рис. 2). В примере эта линия соответствует рукаву с внутренним диаметром 14 мм.

Номограмма определения минимального диаметра воздухоподводящего рукава, обеспечивающего заданную мощность привода пневмомашин

Для пневмомашин с мощностью привода более 1,3 кВт требуются воздухоподводящие рукава с внутренним диаметром не менее 13 мм, которые имеют весьма высокую жесткость, что затрудняет работу оператора с ручным пневмоинструментом. В принципе, допустимо применение воздухоподводящего рукава с диаметром ниже рекомендованного паспортом значения, но только в тех случаях, когда привод машины спроектирован с определенным запасом по мощности, то есть за счет увеличения расхода газа привода. Уменьшение диаметра рукава при имеющемся запасе мощности привода является достаточно распространенной практикой, что подтверждается данными каталога пневмоинструмента фирмы Атлас Копко [4], где две шлифовальные машины с различной мощностью, например, машина LSR48 S090-10, мощностью 1,5 кВт и машина LSR64S100-15, мощностью 2,9 кВт, имеют подводящие шланги с одинаковым рекомендованным внутренним диаметром 16 мм. Аналогичный пример из того же каталога [4] - машина LSR28S150-CW, мощностью 0,7 кВт и машина

LSR38S180-CW, мощностью 1,35 кВт, имеют подводные шланги с одинаковым рекомендованным внутренним диаметром 13 мм.

В таких случаях первоочередной задачей расчета параметров воздухоподводящего рукава является определение минимально допустимого диаметра, при котором еще возможно обеспечить заданную мощность привода пневматической машины, работающей совместно с подводным рукавом.

Подход к решению данной задачи можно найти из анализа изменения располагаемой мощности потока при течении газа с трением в подводном рукаве. Располагаемой мощностью потока называется произведение расхода потока газа на располагаемый перепад энтальпий в выходном сечении рукава: $N_{расп} = GH$. Располагаемая мощность потока определяет максимальную величину мощности, которая в принципе может быть использована в пневматическом приводе, работающем совместно с подводным рукавом. При увеличении расхода воздуха (G) потери давления в рукаве возрастают, а располагаемый перепад энтальпий (H) снижается, следовательно, функция $N_{расп} = GH$ должна иметь экстремум по расходу. Мощность привода ($N_{прив}$) связана с располагаемой мощностью потока ($N_{расп}$) уравнением

$$N_{прив} = N_{расп} \eta_e = GH \eta_e, \quad (6)$$

$$\text{где: } G = \sqrt{\left\{ \frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right\} \frac{\pi d^2}{4} \frac{P_0^*}{\sqrt{T_0^*}} q(\lambda_0)} -$$

массовый расход газа, определенный по параметрам газа во входном сечении рукава 0-0;

$$H = C_p T_0^* \left[1 - \left(\frac{\Pi}{\sigma} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] - \text{располагаемый}$$

перепад энтальпий, определенный по параметрам газа в выходном сечении рукава 1-1, т.е. с учетом падения давления на участке рукава 0-1; P_0^*, T_0^* – давление и температура торможения потока во входном сечении (0-0) рукава; P_{2cm} – статическое

давление потока на выходе из двигателя; $\Pi = \frac{P_{2cm}}{P_0^*}$

- располагаемый перепад давлений; C_p – теплоемкость газа; R – газовая постоянная; d – внутренний диаметр рукава; σ – коэффициент сохранения давления на участке (0-1); η_e – эффективный к.п.д. привода. Уравнение располагаемой мощности потока с учетом допущения (3) и уравнения связи параметров (5), после группировки в фигурных скобках всех членов уравнения, не содержащих σ , можно записать в следующем виде:

$$N = \left\{ P_0^* \sqrt{T_0^* \frac{\pi d^2}{4} C_p \chi^{-0,5} \eta_e \sqrt{\frac{k}{R} \frac{2}{k+1}}} \right\} (1 - \sigma^2)^{0,5} * \left[1 - \left(\frac{\Pi}{\sigma} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right].$$

Обозначим через $A = \left\{ P_0^* \sqrt{T_0^* \frac{\pi d^2}{4} C_p \chi^{-0,5} \eta_e \sqrt{\frac{k}{R} \frac{2}{k+1}}} \right\},$

Тогда

$$N = A * (1 - \sigma^2)^{0,5} * \left[1 - \left(\frac{\Pi}{\sigma} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]. \quad (7)$$

Из (7) следует, что при заданных начальных параметрах газа P_0^* и T_0^* , зависимость мощности привода от расхода полностью определяется

функцией $\bar{N} = q(\lambda_0) \left[1 - \left(\frac{\pi}{\sigma} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right].$ Были

выполнены численные расчеты зависимости приведенной мощности $\bar{N} = f(\lambda_0)$ для различных величин приведенной длины трубы χ [9], которые показали, что при увеличении безразмерного расхода газа $q(\lambda_0)$, принятого в форме (3), функция

$\bar{N}$ вначале возрастает до определенной максимальной величины, а затем резко снижается из-за падения давления в подводном рукаве, что отражено на рис.3.

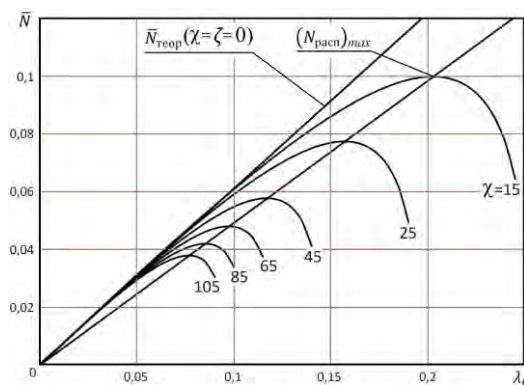


Рис.3. Зависимость приведенной располагаемой мощности $\bar{N}$ от безразмерной скорости потока λ_0 для различных значений χ при $\pi = \frac{0,102}{0,63} = 0,16$.

Очевидно, что относительно достигнутой в конкретном рукаве максимальной располагаемой мощности потока, внутренний диаметр этого рукава является минимально допустимым, поскольку при его уменьшении потери давления возрастут и, соответственно, максимальная располагаемая мощность потока снизится. Таким образом,

минимальную величину диаметра рукава для обеспечения заданной мощности привода следует определять исходя из условий достижения максимальной располагаемой мощности потока при его течении с трением в рукаве.

Используя (7), определим условия достижения максимума мощности из решения уравнения

$$\frac{\partial N}{\partial \sigma} = 0.$$

$$\frac{\partial N}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left\{ A(1 - \sigma^2)^{0,5} \left[1 - \left(\frac{\Pi}{\sigma} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\} = 0. \quad (8)$$

Комплекс A , не содержащий переменную σ , может быть вынесен за скобки и сокращен. Следовательно, параметры, входящие в комплекс A (в том числе и приведенная длина трубы χ) не определяют условия достижения максимума мощности. После алгебраических преобразований уравнение (8) можно привести к выражению:

$$\frac{1}{k} \sigma^{\frac{1-k}{k}}_{N_{\max}} = \left(\frac{1-k}{k} \right) \sigma^{\frac{1-3k}{k}}_{N_{\max}} = \Pi^{\frac{1-k}{k}}, \quad (9)$$

где: $\sigma_{N_{\max}}$ – коэффициент сохранения давления, соответствующий максимально достижимой мощности привода.

В работе [9] показано, что в диапазоне $0 \leq \sigma_{N_{\max}} \leq 0,9$ величина $\sigma^{\frac{1-k}{k}}_{N_{\max}} \approx 1$. Тогда получим формулу для определения коэффициента сохранения давления $\sigma_{N_{\max}}$, соответствующего максимальной располагаемой мощности:

$$\sigma_{N_{\max}} \cong \left\{ \left(\frac{k}{k-1} \right) \left[\Pi^{\frac{1-k}{k}} - \frac{1}{k} \right] \right\}^{\frac{k}{1-3k}}, \quad (10)$$

Из (10) следует, что величина $\sigma_{N_{\max}}$ полностью определяется единственным параметром – располагаемым перепадом давлений $\Pi = \frac{P_{2cm}}{P_0^*}$ и не

зависит от гидравлических характеристик системы, выраженных приведенной длиной трубы χ . Данный результат позволяет, положив $\sigma = \sigma_{N_{\max}}$ в условии связи параметров (5), определить величину максимальной располагаемой мощности потока для любого сочетания расхода, длины и диаметра рукава, что, в свою очередь, позволяет определить величину минимального диаметра рукава $d_{\min}$, при котором еще обеспечивается заданная мощность привода. Для практического использования методику расчета параметров рукава целесообразно представить номограммой, связывающей длину и минимально допустимый диаметр рукава с максимальной располагаемой мощностью потока.

Параметры расчета номограммы: $P_0^* = 0,63$ МПа; $T_0^* = 293$ К. Согласно (10), величина $\sigma_{N_{\max}} = 0,586$. Максимальная располагаемая мощность потока для любого сочетания длины и диаметра рукава будет достигнута при давлении в выходном сечении рукава $P_0^* = P_0^* \sigma_{N_{\max}} = 0,396$ МПа, располагаемый перепад энтальпий при этом составит $H = 90607$ Дж/кг. Номограмма приведена на рис.4.

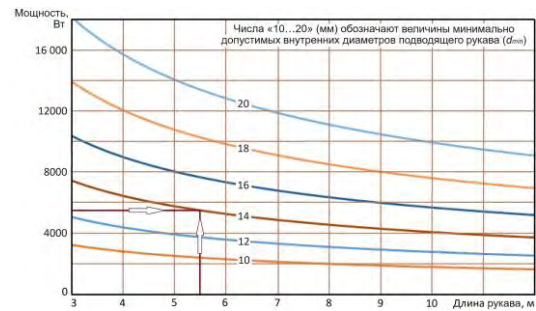


Рис. 4. Номограмма для определения минимального внутреннего диаметра рукава

Приведем пример использования номограммы. Пусть требуется определить минимальный внутренний диаметр рукава $d_{\min}$, имеющего длину 5,5 м, обеспечивающего работу машины с мощностью $N_{прив} = 2000$ Вт при эффективном к.п.д. привода $\eta_e = 0,35$. Необходимая располагаемая мощность потока, согласно (6)

$$\text{составляет: } N_{расп} = \frac{N_{прив}}{\eta_e} = \frac{2000}{0,35} = 5714 \text{ Вт.}$$

Требуемый минимальный внутренний диаметр рукава определяет ближайшая линия номограммы, лежащая выше точки пересечения линий располагаемой мощности и длины рукава (рис. 4). В примере эта линия соответствует рукаву с внутренним диаметром $d_{\min} = 14$ мм. Расход газа, соответствующий $N_{расп} = 5714$ Вт составит согласно (6):

$$G = \frac{N_{расп}}{H} = \frac{5714}{90607} = 0,06306 \text{ кг/с} = 3145 \text{ л/мин}$$

Сравним величину полученного расхода газа (3 145 л/мин) с расходом, полученным при работе машины с подводящим рукавом с допустимой величиной падения давления на участке рукава 0-1 $\Delta P_{0-1}^* = 0,063$ МПа, что соответствует $\sigma = 0,9$. Из номограммы на рис.1 следует, что для машины с заданной мощностью $N_{прив} = 2000$ Вт расход газа составит

$$G = \frac{N_{расп}}{H} = \frac{5714}{113958} = 50 \text{ г/с} = 2500 \text{ л/мин.}$$

Согласно номограмме на рис.1 при расходе воздуха

машины 2 500 л/мин и длине рукава 5,5 м требуется рукав с диаметром 17 мм.

Таким образом, чтобы уменьшить диаметр рукава с 17 до 14 мм при той же мощности привода $N_{прив} = 2000 \text{ Вт}$ требуется увеличить расход воздуха с 2 500 л/мин до 3 145 л/мин, т.е. на 25,8%.

Отметим также, что величина располагаемой мощности $N_{расп}$ и соответствующего ей расхода G , весьма существенно зависит от эффективного КПД привода η_e , поэтому необходимо применять все возможные меры к его повышению [10,11,12,13].

Заключение

Отметим ключевые результаты проведенного исследования:

разработана методика рационального выбора параметров воздухоподводящих рукавов при отклонении их диаметра и длины от паспортных рекомендаций;

трансцендентное уравнение течения газа с трением в цилиндрической трубе (1) было заменено алгебраическим уравнением (5), на основе которого разработана номограмма, связывающая длину и диаметр рукава с расходом сжатого воздуха при условии неизменности заданной величины падения давления воздуха в рукаве, представленная на рис. 1. доказано, что величина коэффициента сохранения полного давления $\sigma_{N_{max}}$ полностью определяется единственным параметром - располагаемым

перепадом давлений $\Pi = \frac{P_{2cm}}{P_0^*}$ и не зависит от

длины и диаметра рукава. Используя этот результат и условие связи параметров (5) была определена величина максимальной располагаемой мощности

потока для любого сочетания расхода, длины и диаметра рукава. В результате, разработана номограмма для определения величины минимального диаметра рукава d_{min} , при котором обеспечивается заданная мощность привода, представленную на рис.4.

доказано, что для достижения максимальной мощности привода должна быть затрачена строго определенная доля располагаемой мощности потока, при этом коэффициент сохранения полного давления $\sigma_{N_{max}}$, давление перед приводом P_1^* и располагаемый перепад энтальпий не зависят от параметров рукава и определяются только величиной располагаемого перепада давлений

$$\Pi = \frac{P_{2cm}}{P_0^*}, \text{ то есть:}$$

$$P_1^* = P_0^* \sigma_{N_{max}} = idem \quad \text{и}$$

$$H = C_p T_0^* \left[1 - \left(\frac{\Pi}{\sigma} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = idem.$$

Следствием этого результата является то, что все значения максимальной приведенной мощности $\bar{N}_{max}$, определенные при различных величинах χ , будут принадлежать прямой линии

$$\bar{N}_{max} = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda_0 \left[1 - \left(\frac{\Pi}{\sigma_{N_{max}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right],$$

являющейся геометрическим местом точек максимумов значений приведенной мощности, что проиллюстрировано на рисунке 3.

Литература

1. Кузнецов Ю.П., Химич В.Л., Хрунков С.Н., Чуваков А.Б., Погодин Р.А. Тенденции и перспективы развития ручных шлифовальных пневматических машин // Морские интеллектуальные технологии. 2021. №4, том 1 (сквозной номер 54). С.47-52.
2. BIAx Professional Power. Шлифовальные машины, напильники, машинки для удаления грата [Электронный ресурс] // ST-Group: официальный дилер в России. URL: https://www.s-t-group.com/catalogs/stock/biax/Catalog_01.pdf (дата обращения: 09.04.2021).
3. Ata tools. Пневматический инструмент [Электронный ресурс] // ООО «ИНСТЕК»: дистрибьютер инструмента в России. URL: <https://instek.su/f/katalog-pnevmoinstrumenta-ata-2011.pdf> (дата обращения 09.04.2021).
4. Atlas Copco. Промышленный инструмент для производства, технического обслуживания и ремонта [Электронный ресурс] // Atlas Copco: Производитель инструмента. URL: <https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/local-countries/russia/documents/9833-2001-01-f-m-bolting-2020-rus-web.pdf> (дата обращения: 09.04.2021).
5. Шлифмашинки Air Turbine [Электронный ресурс] // ООО «Ветки»: официальный дилер в России. URL: http://www.vetki.ru/assets/files/PDFs/Vendors/AirTurbine_HandToolsSeries_RUS.pdf (дата обращения: 09.04.2021).
6. Deprag industrial. Каталог промышленный инструмент Deprag.
7. ГОСТ 12634-80. Машины ручные шлифовальные пневматические. Технические условия. Введ. 1981-01-01 М., 1985, 6с.
8. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. М.: Энергия, 1974. - 592с.
9. Кузнецов Ю.П., Согласование параметров неавтономного пневматического привода с гидравлическими характеристиками подводящей системы. / Ю.П. Кузнецов, Т.Ю. Кузнецова. //Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Т69. Энергетические установки и теплотехника. Вып.2.-Н. Новгород: НГТУ, 2010. – С.86-94.
10. Кузнецов Ю.П., Химич В.Л., Хрунков С.Н., Чуваков, А.Б. Погодин Р.А. Исследование характеристик радиальной реактивной турбины // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2020. №4. – С. 146-154.

11. Кузнецов Ю.П., Хрунков С.Н. Чуваков А.Б., Погодин Р.А. Разработка турбопривода для быстроходных ручных шлифовальных пневматических машин повышенной мощности. // Морские интеллектуальные технологии. 2023. №3, часть 1. – С. 36-42.
12. Fershalov Andrey Yu.; Fershalov Yuriy Ya.; Fershalov Mikhail Yu. Efficiency of the small-sized turbine stages with small outlet angle of nozzles // Marine intellectual technologies. 2018. № 1-1 (39). P. 57-62.
13. Yurtaev Aleksandr A.; Fershalov Andrey Y.; Fershalov Yuriy Ya.; Porshkevich Viktor V. Energy efficiency optimization of axial-flow microturbine staging with partial integration of impeller into nozzle blade cascade // Marine intellectual technologies. 2019. № 3-3 (45). P. 59-63.

References

1. Kuznetsov Yu.P., Khimich V.L., Khrunkov S.N., Tchuvakov A.B., Pogodin R.A. Trends and prospects of development of manual pneumatic grinding machines // Marine intellectual technologies. 2021. No. 4, volume 1 (through number 54). pp.47-52.
2. BIAХ Professional Power. Grinding machines, files, deburring machines [Electronic resource] // ST-Group: official dealer in Russia. URL: https://www.s-t-group.com/catalogs/stock/biax/Catalog_01.pdf (accessed: 09.04.2021).
3. Ata tools. Pneumatic tool [Electronic resource] // INSTEK LLC: distributor of the tool in Russia. URL: <https://instek.su/f/katalog-pnevmoinstrumenta-ata-2011.pdf> (accessed 09.04.2021).
4. Atlas Copco. Industrial tools for production, maintenance and repair [Electronic resource] // Atlas Copco: Tool manufacturer. URL: <https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/local-countries/russia/documents/9833-2001-01-f-m-bolting-2020-rus-web.pdf> (accessed: 09.04.2021).
5. Air Turbine grinders [Electronic resource] // Company "Vetki": official dealer in Russia. URL: http://www.vetki.ru/assets/files/PDFs/Vendors/AirTurbine_HandToolsSeries_RUS.pdf (accessed: 09.04.2021).
6. Deprag industrial. The Deprag industrial tool catalog.
7. GOST 12634-80. Pneumatic manual grinding machines. Technical conditions. Introduction 1981-01-01 M., 1985, 6s.
8. Deich M.E. Technical gas dynamics. M.: Energy, 1974. - 592s.
9. Kuznetsov Yu.P., Coordination of parameters of a non-autonomous pneumatic drive with hydraulic characteristics of the supply system. / Yu.P. Kuznetsov, T.Y. Kuznetsova. //Proceedings of the NSTU named after R.E. Alekseeva. T69. Power plants and heat engineering. Issue 2.-N. Novgorod: NSTU, 2010. – pp.86-94.
10. Kuznetsov Yu.P., Khimich V.L., Khrunkov S.N., Tchuvakov, A.B. Pogodin R.A. Investigation of the characteristics of a radial jet turbine // News of higher educational institutions. Russian Aeronautics. 2020. №4. – С. 146-154.
11. Kuznetsov Yu.P., Khrunkov S.N. Tchuvakov A.B., Pogodin R.A. Development of a turbo drive for high-speed manual pneumatic grinding machines of increased power. // Marine intellectual technologies. 2023. No. 3, part 1. – pp. 36-42.
12. Fershalov Andrey Yu.; Fershalov Yuriy Ya.; Fershalov Mikhail Yu. Efficiency of the small-sized turbine stages with small outlet angle of nozzles // Marine intellectual technologies. 2018. № 1-1 (39). P. 57-62.
13. Yurtaev Aleksandr A.; Fershalov Andrey Y.; Fershalov Yuriy Ya.; Porshkevich Viktor V. Energy efficiency optimization of axial-flow microturbine staging with partial integration of impeller into nozzle blade cascade // Marine intellectual technologies. 2019. № 3-3 (45). P. 59-63.

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

Кузнецов Юрий Павлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Энергетические установки и тепловые двигатели», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: inturbo@yandex.ru

Yuri P. Kuznetsov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department "Power Plants and Heat Engines", Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 603155, Nizhny Novgorod, Minina str., 24, e-mail: inturbo@yandex.ru

Чуваков Александр Борисович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Энергетические установки и тепловые двигатели», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: tchouvakov@mail.ru

Alexander B. Tchuvakov, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department "Power Plants and Heat Engines", Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 603155, Nizhny Novgorod, Minina str., 24, e-mail: tchouvakov@mail.ru

Погодин Роман Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические установки и тепловые двигатели», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: rpogodin@yandex.ru

Хрунков Сергей Николаевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Энергетические установки и тепловые двигатели», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: khrunkov@nntu.ru

Крайнов Артем Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические установки и тепловые двигатели», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: art.kr-91@mail.ru

Roman A. Pogodin, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department "Power Plants and Heat Engines", Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 603155, Nizhny Novgorod, Minina str., 24, e-mail: rpogodin@yandex.ru

Sergey N. Khrunkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department "Power Plants and Heat Engines", Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 603155, Nizhny Novgorod, Minina str., 24, e-mail: khrunkov@nntu.ru

Artem A. Kraynov, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department "Power Plants and Heat Engines", Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 603155, Nizhny Novgorod, Minina str., 24, e-mail: art.kr-91@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 30.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 09.02.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 11.02.2024.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ) SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Научная статья

УДК 621.825 (0131)

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.010>

Методика проектирования гиперболических канатных муфт «MAMSar»

Минасян М.А.¹ mamsar@mail.ru, Минасян А.М.¹ menos405@gmail.com

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Цель статьи – предоставить на суд читателей некоторые аспекты проектирования муфт с упругим элементом из дугообразных или полукруглых стальных канатных элементов.

Главная задача виброизолирующих муфт – обеспечить передачу крутящего момента на вал при одновременном уменьшении крутильной, продольной и поперечной составляющих вибрации. Однако, создание виброизолирующих муфт, эффективных по всем трем направлениям колебательных составляющих, является весьма сложной, но актуальной задачей. В представленной работе выдвинута, экспериментально и теоретически подтверждена гипотеза о возможности использования виброизолирующих опор «MAMSar» по новому назначению, а именно в качестве координатно-виброизолирующих муфт приводов.

Полученные по всем видам деформации нагрузочные характеристики – гистерезисные петли, жесткости, коэффициенты демпфирования и поглощения как исследуемых гиперболических канатных муфт, так и отдельных упругих элементов позволят проектировать и создать ряд новых муфт.

Следующая работа будет посвящена результатам экспериментальных исследований координатно-виброизолирующей эффективности опытных образцов муфт системы «электродвигатель-поршневой компрессор».

Ключевые слова: муфты, канатные муфты, композитные муфты, координатные муфты, виброизолирующие муфты, жесткость, коэффициенты демпфирования и поглощения муфт.

Финансирование: Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030», Стратегического проекта №2 «Цифровая трансформация университета и промышленных предприятий на основе Интеллектуальной киберфизической платформы».

Для цитирования: Минасян М.А., Минасян А.М. Методика проектирования гиперболических канатных муфт MAMSAR, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 89—96. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.010

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.010>

Method of designing hyperbolic rope couplings "MAMSar"

Minas A. Minasyan¹ mamsar@mail.ru, Armen M. Minasyan¹ menos405@gmail.com

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The purpose of the article is to provide readers with some aspects of the design of couplings with an elastic element made of arc-shaped or semicircular steel rope elements.

The main task of vibration isolating couplings is to ensure the transmission of torque to the shaft while reducing the torsional, longitudinal and transverse components of vibration. However, the creation of vibration-isolating couplings that are effective in all three directions of oscillatory components is a very difficult but urgent task. In the presented work, the hypothesis about the possibility of using MAMSar vibration-isolating supports for a new purpose, namely as coordinate-vibration-insulating drive couplings, is put forward, experimentally and theoretically confirmed.

The load characteristics obtained for all types of deformation – hysteresis loops, stiffness, damping and absorption coefficients of both the studied hyperbolic rope couplings and individual elastic elements will allow us to design and create a number of new couplings.

The next work will be devoted to the results of experimental studies of the coordinate-vibration-insulating efficiency of prototypes of couplings of the "electric motor-piston compressor" system.

Keywords: couplings, rope couplings, composite couplings, coordinate couplings, vibration-isolating couplings, stiffness, damping and absorption coefficients of couplings.

Financial Support: The work was carried out within the framework of the strategic academic leadership program "Priority 2030", Strategic Project No. 2 "Digital transformation of the University and industrial enterprises based on an Intelligent cyber-physical platform".

For citation: Minas A. Minasyan, Armen M. Minasyan, Method of designing hyperbolic rope couplings "MAMSar". Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 89—96. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.010

Введение

Цель определения крутильной жесткости, коэффициентов демпфирования и поглощения дугообразных канатных элементов (ДКЭ) по экспериментальным нагрузочным характеристикам опытных образцов гиперболических канатных муфт (ГКМ) (рис.1) – использование этих характеристик при разработке методики проектирования и создания ГКМ.

Объектом исследования являются ДКЭ (рис. 2) на основе экспериментально исследуемых статических характеристик опытных образцов ГК муфт, представленных на рис.1.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. На основе экспериментально полученных нагрузочных характеристик опытных образцов ГКМ «MAMSar» (рис. 1) построить соответствующие нагрузочные характеристики для ДКЭ.

2. Определить крутильные жесткости, коэффициенты демпфирования и поглощения ДКЭ.

3. Составить алгоритм выбора исходных данных и определения размеров ГКМ.

Патентные исследования и примеры применения стальных канатов в качестве упругого элемента в виброизолирующих конструкциях и креплениях подтверждают широкий спектр их применения как за рубежом, так и в России [3, 4, 6, 7, 9]. На основе рассмотренных известных источников, а также работ «MAMSar», выдвигается **гипотеза** о возможности применения стального каната в качестве наиболее подходящего упругого элемента координатных виброизолирующих муфт.

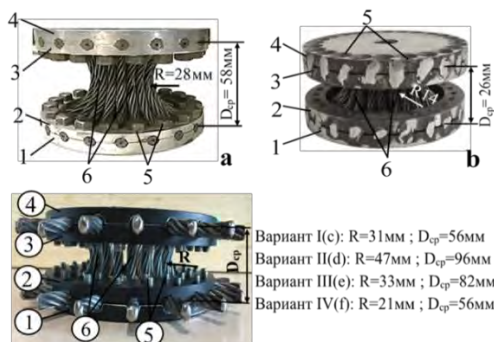


Рис. 1. Опытные образцы муфт «MAMSar» с основными размерами:

1 – ведущий фланец, 2 – ведущее кольцо, 3 – ведомое кольцо, 4 – ведомый фланец, 5 – винты, 6 – упругий стальной канатный элемент

В предлагаемых конструкциях упругие элементы представляют систему коротких криволинейных-дугообразных или полукруглых стержней, изогнутых в виде дуг или полукругов, закрепленных одним концом к нижнему опорному элементу, другим – к верхнему и расположенных к этим опорным элементам вертикально [3].

Учитывая, что совместно все дугообразные или полукруглые стальные канатные элементы имеют форму гиперболы [3], такие муфты названы гиперболическими канатными муфтами.

Каждый упругий изолирующий элемент имеет свои характеристики, определяемые диаметром троса, количеством жил, длиной троса и степенью

его скрученности и количеством дугообразных или полукруглых канатных отрезков.

При проектировании ГКМ необходимо учесть следующие основные особенности стальных канатов [3, 6, 7, 9]:

1 Специфическая сложность структуры;
 2 Конструктивная анизотропность (неодинаковость);
 3 Точность угла свивки и шага проволок в пряди и самих прядей;

4 Неповсеместность и неодинаковость плотного линейного или точечного контакта жил (проволок) друг к другу или к центральной жиле после снятия каната с навивального станка;

5 Искривленность винтообразной формы жил из-за неравномерности шага навивки (угла свивки каната);

6 Весьма неопределенное распределение точек контакта жил по их длине после преобразования из прямолинейной формы в кольцевую (упругий элемент виброизолятора) с приобретением пластической деформации изгиба;

7 Влияние изменений кривизны упругого канатного элемента – полукольца или дуги на напряжение «волокон» при нагружении;

8 Различность поведения каната до и после вступления жил во взаимодействие и возникновения контактных сил;

9 Необходимость строгого разграничения этапа нагружения до вступления жил во взаимодействие и этапа – после возникновения контактных сил;

10 Действие сил трения, возникающих между прижатыми друг к другу проволоками, которые оказывают дополнительное сопротивление изгибу и скручиванию каната при действии нагрузки;

11 Сложность обеспечения точности характеристик каната, так как навивка каната – сложный комплекс различных процессов;

12 Рост предварительного напряженного состояния полукольца по мере увеличения кривизны;

13 Непостоянство жесткости, обусловленное изменением характера взаимодействия между проволоками каната в точке изменения знака деформации;

14 Невозможность применения метода тензометрии для изучения свойств анизотропии каната;

15 Сложность учета влияния процесса свивания и навивки упругого элемента муфты на характеристику последней и т.д.

Учитывая вышеперечисленные особенности стальных канатов, а также наличие некоторых опытных образцов гиперболических канатных виброизоляторов MAMSar [3], целесообразно на первом этапе их использовать по новому назначению, то есть в качестве виброизолирующих муфт. Алгоритм достижения этой цели включает последовательное решение следующих задач:

1. Статическое испытание на кручение опытных образцов гиперболических канатных опорных виброизоляторов в качестве муфт, состоящих из:

– 24 дугообразных или полукруглых отрезков каната с диаметром 5,6 мм (рис. 2);

– 20 дугообразных или полукруглых отрезков каната с диаметром 5,1 мм (рис. 2);

– 20 дугообразных или полукруглых отрезков каната с диаметром 12 мм (рис. 2).

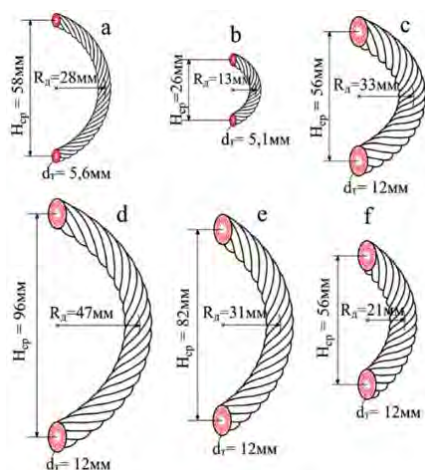


Рис. 2. Дугообразные канатные элементы

2. Перестроение нагрузочных характеристик исследуемых муфт для одного дугообразного или полукруглого отрезка (куска) стального каната.

3. Определение крутильной жесткости, коэффициентов демпфирования и поглощения одного дугообразного или полукруглого отрезка стального каната по каждой муфте.

1. Определение крутильной жесткости, коэффициентов демпфирования и поглощения дугообразных или полукруглых отрезков стальных канатов диаметрами 5,1; 5,6 и 12 мм

На рис. 3 представлены соответствующие нагрузочные упругие характеристики дугообразных канатных элементов.

Блок-схема определения крутильной жесткости, коэффициента демпфирования и поглощения ДКЭ представлена на рис. 4.

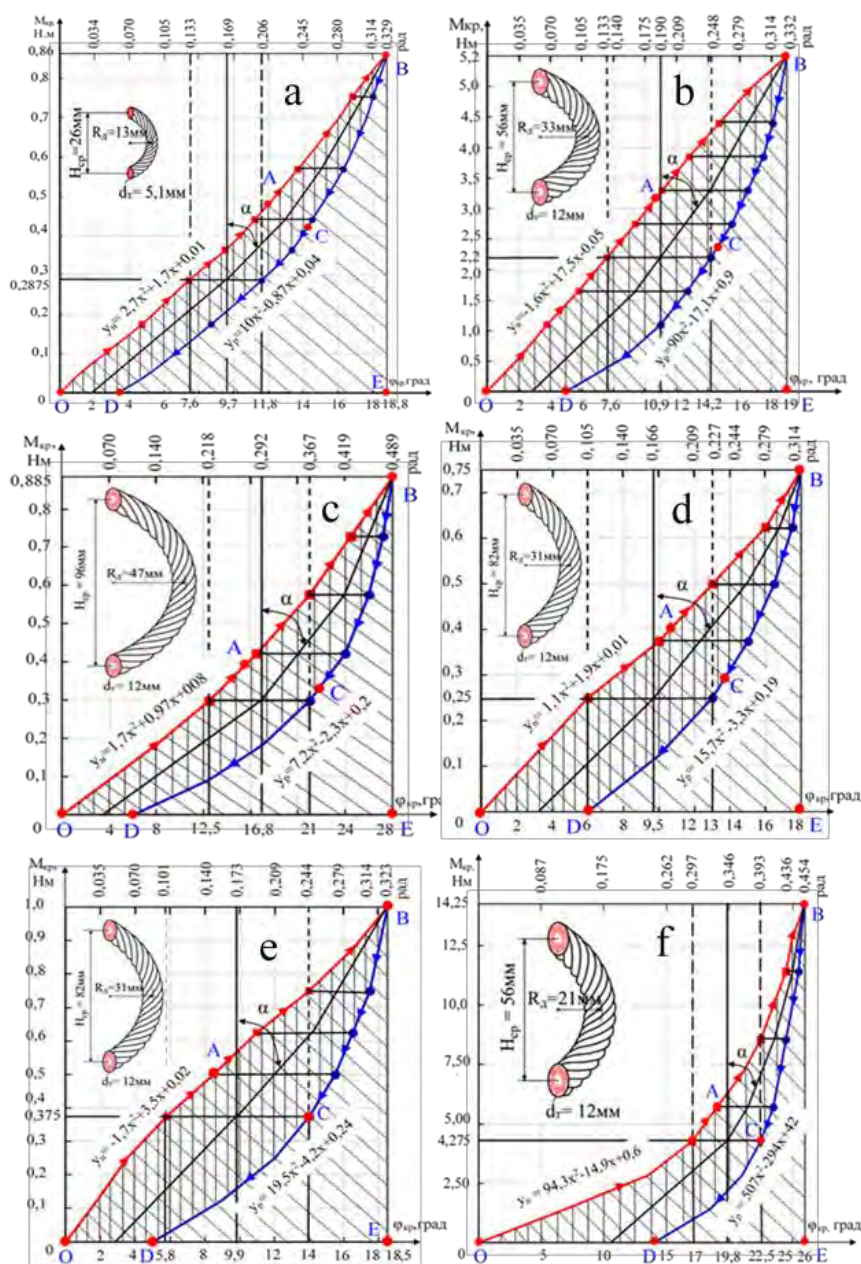


Рис. 3. Нагрузочные характеристики на кручение дугообразных канатных элементов (рис. 1, 2)

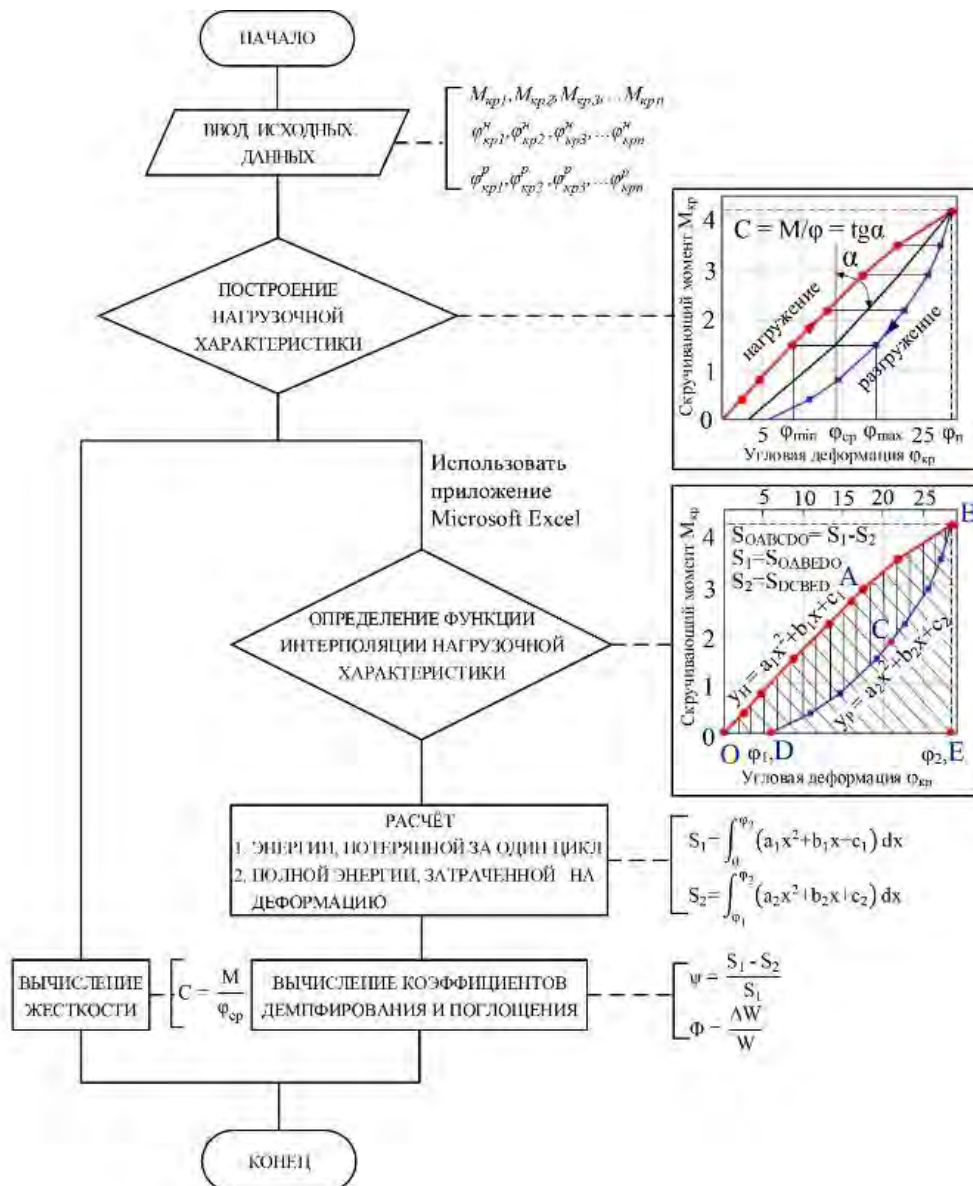


Рис. 4. Блок-схема определения жесткости, коэффициентов демпфирования и поглощения ДКЭ

С помощью приложения Microsoft Excel линии нагружения и разгружения ДКЭ выражаются уравнениями [8]:

$$y_H = a_1 x^2 + b_1 x + c_1 \quad (1)$$

$$y_p = a_2x^2 + b_2x + c_2, \quad (2)$$

где u_n , u_p – ординаты соответствуют крутящему моменту при нагружении и разгрузке ДКЭ; x – абсцисса соответствует углу закручивания φ при нагружении и разгрузке ДКЭ; a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 – коэффициенты определены приложением Microsoft Excel.

$S_{OABCD O}$ – площадь ограничена линиями $y_H = a_1x^2 + b_1x + c_1$ и $y = 0$ на отрезке $(0, \varphi_2)$ [5]:

$$S_{OABEO} = \int_0^{\varphi_2} (a_1 x^2 + b_1 x + c_1) dx \quad (3)$$

S_{DCBED} – площадь ограничена линиями $y_p = a_2x^2 + b_2x + c_2$ и $y = 0$ на отрезке (φ_1, φ_2) [5]:

$$S_{DCBED} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (a_2 x^2 + b_2 x + c_2) dx \quad (4)$$

Коэффициент поглощения (рис. 3, б) [5]:

$$\Phi = \frac{\Delta W}{W}, \quad (5)$$

где W – площадь заштрихованного треугольника равняется работе, совершаемой силами упругости за четверть цикла колебаний ДКЭ, и характеризует накопленную в нем энергию; ΔW – площадь замкнутой петли гистерезиса равняется работе, совершаемой силами внутреннего трения в конструкции ДКЭ за один цикл колебаний, и характеризует рассеиваемую им энергию.

В динамические расчеты коэффициент Φ входит вместе с множителем $\frac{1}{2\pi i}$, характеризующим цикличность процесса, поэтому в теории удобнее оперировать с величиной [5]:

$$\psi = \frac{\Phi}{2\pi} = \frac{\varphi_H}{\varphi_0} = \frac{M_H}{M_0}, \quad (6)$$

где Ψ – коэффициент неупругого сопротивления, который можно называть также коэффициентом демпфирования ДКЭ; Φ – коэффициент поглощения.

Представленные зависимости справедливы также для схем экспериментального определения упругих деформаций осевого сдвига, излома и радиального смещения ДКЭ.

Функции интерполяции нагружения и разгружения выражаются соответственно уравнениями [8]:

$$y_n = 0,17x^2 + 0,55x + 0,002,$$

$$y_p = 2,6x^2 - 0,34x + 0,015.$$

Коэффициент демпфирования одного ДКЭ (рис. 4, а):

$$\Psi = \frac{S_{OABCO}}{S_{OABEO}} = \frac{0,015}{0,035} = 0,45,$$

где

$$S_{OABEO} = \int_0^{0,342} (0,17x^2 + 0,55x + 0,002) dx = 0,035$$

$$S_{DCBED} = \int_{0,079}^{0,342} (2,6x^2 - 0,34x + 0,015) dx = 0,019$$

$$S_{OABCO} = 0,035 - 0,019 = 0,016$$

Из (6) имеем:

$$\Phi = 2\pi\Psi = 2\pi \cdot 0,45 = 2,827 \quad (10)$$

$$M_n = \Psi M_0 = \Psi c \varphi_0 = 0,45 \cdot 0,105 = 0,0473 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (11)$$

Таким образом момент неупругого сопротивления пропорционален жесткости c и амплитуде упругой деформации φ_0 .

Значения жесткостей, коэффициентов демпфирования и поглощения других дугообразных канатных упругих элементов (рис. 2, б – ф) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Жесткости, коэффициенты демпфирования и поглощения всех дугообразных упругих элементов (рис. 1, а – ф)

Рис. 5	$M_{кр},$ Н·м	$C_d,$ Н·м	Ψ	Φ	$M_n = \Psi M_0,$ Н·м
a	0,21	0,42	0,45	2,83	0,05
b	0,86	1,70	0,35	2,21	0,15
c	5,2	11,60	0,53	3,36	1,40
d	0,89	1,03	0,50	3,11	0,22
e	0,75	1,55	0,56	3,50	0,21
	1,00	2,18	0,59	3,72	0,30
f	14,25	12,40	0,62	4,00	4,42
	12,83	12,70	0,63	4,00	4,06

2 Методика проектирования гиперболических канатных муфт

Важной стадией проектирования гиперболических канатных муфт является формулирование цели (целей) виброизоляции. От того, как это сделано, во многом зависит

обоснование ограничений и технических условий, которые позволяют сузить число рассматриваемых вариантов и тем самым избежать неоправданных затрат на поиск лучшего варианта. Здесь важно использовать накопленный опыт создания и применения канатных виброизоляторов MAMSar [3].

Основным содержанием методики проектирования гиперболических канатных муфт является:

- подготовка основных исходных данных (примерные габаритные размеры муфты, величины крутящего момента, максимальный угол закручивания муфты, требования по обеспечению излома и перемещения осей муфты);
- выбор диаметра каната, кривизны дуги или радиуса канатного полукольца;
- выбор общего числа канатных упругих элементов – полуколец или дуг;
- проектирование гиперболической канатной муфты.

Соответствующий алгоритм выбора исходных данных и определения размеров гиперболической канатной муфты (рис. 5) для диаметров каната 9,5 мм и полукруга 91 мм, представлен в таблицах 2.3, 2.4 [3].

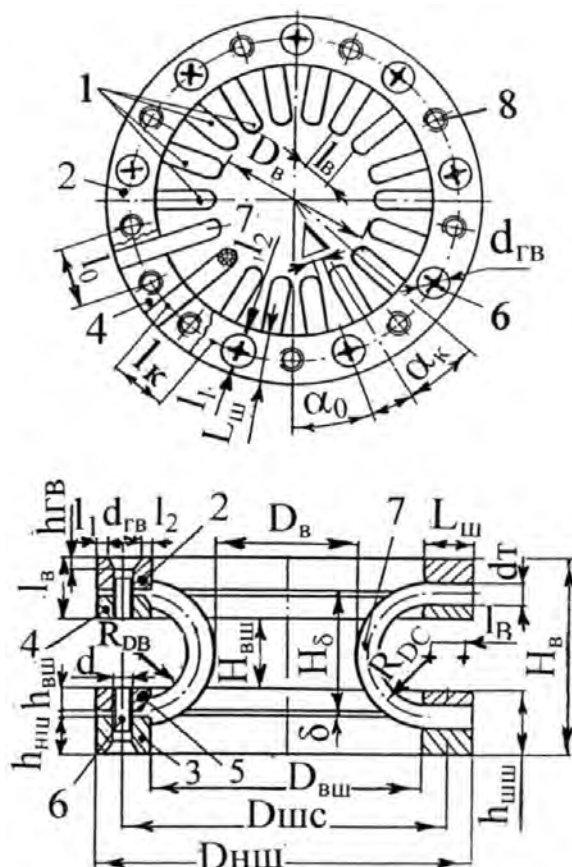


Рис. 5. Гиперболическая канатная муфта:
1 – упругий элемент; 2, 3 – опорные пластины; 4, 5 – прижимные пластины;
6 – крепежные средства; 7 – стальной канат;
8 – отверстия для крепления муфты

Таблица 2

Исходные данные для определения размеров канатной муфты с компонентами

№ п.п.	Наименование, размерность	Обозначения, формулы, пределы, и т.п.	ГКМ
1	Диаметр каната, мм	d_T	9,5
2	Число канатных полуколец или дуг	i	16
3	Средний диаметр УЭ, мм	$D_{пк} = H_3 = S_{пк} d_T$	91,5
4	Наружный диаметр УЭ, мм	$D = D_{пкн} = D_{пк} + d_T$	101
5	Внутренний диаметр УЭ, мм	$D_{пкв} = D_{пк} - d_T$	82
6	Средний радиус УЭ, мм	$R_{DC} = 0,5 D_{пк}$	45,75
7	Наружный радиус УЭ, мм	$R_{DN} = 0,5 D_{пкн} = 0,5 D$	50,5
8	Внутренний радиус УЭ, мм	$R_{DB} = 0,5 D_{пкв}$	41
9	Номинальная продольная нагрузка УЭ, Н	$P_{пк}$	480
10	Минимальный зазор между смежными упругими элементами, мм	$\Delta = \frac{2\pi R_{DN}}{i_B} - d_T$	21,5
11	Шаг витков по внутренней окружности, мм	$l_B = d_T + \Delta$	31
12	Высота между внутренними пластинами М, мм	$H_{вп} = H_{вш} \approx D_{пк} - 2d_T$	72,5
13	Свободный ход сжатия М, мм	$S_c = (0,25 \div 0,75) H_{вш}$	min
			max
14	Коэффициент сжатия УЭВ	$k_c = \frac{H_{вш} - S_c}{H_{вш}}$	max
			min
15	Наружный радиус УЭ, мм	$R_{пкн} = 0,5 (D_{пк} + d_T)$	50,5
16	Расширение границы УЭМ, мм	$R_{пкр} = 0,5 (D_{пк} + d_T) + S_c$	min
			max
17	Коэффициент расширения УЭМ	$k_p = \frac{R_{пкр}}{R_{пкн}}$	min
			max
18	Диаметр крепёжных винтов опорных элементов муфты, мм	$(d_T, \text{мм}) / d, \text{мм}$ (1 ÷ 1,5)/1; (2)/2; (3)/3; (1 ÷ 3)/3; (4)/4; (5)/4; (5)/5; (6)/5; (7; 8)/6; (9,5; 9,9; 10)/8; (12; 13)/10	M8
19	Диаметр головки винтов, мм	$d_{гв} \approx 2d$	16
20	Высота головки винтов, мм	$h_{гв} = 0,5d$	4
21	Расстояние от наружного края опорных пластин до края головки винта, мм	$l_1 = 0,5 \div 4$	2
22	Расстояние от внутреннего края опорных пластин до края головки винта, мм	$l_2 = 0,5 \div 4$	2
23	Толщина наружных пластин М, мм	$h_{нш} \geq d_T$	10
24	Толщина внутренних пластин М, мм	$h_{вш} \geq d_T$	10
25	Зазор между наружной и внутренней пластинами муфты, мм	$\delta = (0,1 - 0,2) d_T$	1,6

Таблица 3

Определение размеров гиперболической канатной муфты

№ п.п.	Наименование	Формула	ГКМ
1	Ширина колец М, мм	$L_{ш} = d_{гв} + l_1 + l_2$	20
2	Высота колец М одной пары, мм	$h = h_{нш} + h_{вш} + \delta$	21,6
3	Высота между внутренними кольцами М, мм	$H_{вп} \approx R_{DB} - d_T$	31,5
4	Высота М, мм	$H_B = H_{вп} + 2h$	74,7
5	Диаметр отверстия под винт и болт в опорных пластинах М, мм	$O \approx d_B + (0,2 \div 0,5)$	8,5
6	Внутренний диаметр, ГКМ, мм	$D_B = i \cdot l_B / \pi$	98,7
7	Внутренний диаметр кольца ГКМ, мм	$D_{вш} = 2R_{DN} + D_B$	199,7
8	Наружный диаметр кольца ГКМ, мм	$D_{нш} = D_{вш} + 2L_{ш}$	239,7
9	Средний диаметр кольца ГКВ, мм	$D_{шс} = D_{вш} + L_{ш}$	219,7
10	Углы отверстий и пазов	$\alpha_0 = \alpha_k = 360/i$	36
11	Расстояния отверстий и пазов, мм	$l_0 = l_k = D_{шс} \cdot \sin(\alpha_0/2)$	68,11
12	Максимальная площадь, занимаемая М, мм ²	$S_B = \pi D_B^2 / 4$	44863
13	Максимальный объем, занимаемой М, мм ³	$V_B = \frac{\pi D_B^2}{4} H_B$	3351246
14	Показатель использования площади М (удельная нагрузка), Н/мм ²	$k_s = \frac{P}{S_B}$	0,86
15	Показатель использования объема М (габаритная нагрузка), Н/мм ³	$k_v = \frac{P}{V}$	0,012

Заключение

Обоснована актуальность применения гиперболических канатных муфт для передачи крутящего момента с одновременным уменьшением крутильной, продольной и поперечной составляющих вибрации состыковываемых валов.

Представленные результаты дают основание целесообразности продолжения работ в данном

направлении, в частности экспериментального исследования координатно-виброизолирующей эффективности гиперболических канатных муфт.

Следующая работа будет посвящена результатам экспериментальных исследований координатно-виброизолирующей эффективности опытных образцов муфт системы «электродвигатель-поршневой компрессор».

Литература

1. Александров А.В. Сопротивление материалов / Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Под ред. Александрова А.В. – 4-е изд. испр. – М.: Высшая школа, 2004. – 560 с.
2. Беляковский Н.Г. Конструктивная амортизация механизмов, приборов и аппаратуры на судах. Л.: Судостроение, 1965.
3. Минасян А.М. Создание и развитие средств снижения виброактивности судовых дизель-генераторных агрегатов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб. 2013, 201 с.
4. Поляков В.С. Справочник по муфтам / Поляков В.С., Барбаш И.Д., Ряховский О.А. // Под ред. Полякова В.С. – Л.: Машиностроение, 1979. 344 с.
5. Румб В. К. Конструирование и расчеты прочности судовых валопроводов: учебник / Румб В.К. // – СПб.: СПбГМТУ, 2008. 298 с.
6. Устройство для испытания упругих муфт: пат. № 199499 МПК G01M 7/06/ авторы и заявитель: Минасян М.А., Минасян А.М., Цзэн Цзюньцзе, Лэ Хи Ха. Патентлообладатель СПбГМТУ. Заявл. 24.03.2020; опубл. 03.09.2020, Бюл. № 25. 7 с.
7. Li W. Online Identification and Verification of the Elastic Coupling Torsional Stiffness / Li W., Chai Z., Wang M., Hu X., Guo Y. // Hindawi Shock and Vibration. – 2016, Article ID 2016432. P. –7.
8. Microsoft Excel 2016 Tutorial /https://www.wiley.com/learn/moac/moac-series.html.
9. Shaowu Tu. Effect of Structure Parameters on Polycal Wire Rope Isolator Stiffness-Damping Characteristics/ Shaowu Tu, Xiaofeng Lu, and Xiaolei Zhu// Hindawi Shock and Vibration. – 2019, Article ID 4525798. P. –10.

Reference

1. Aleksandrov A.V. Soprotivlenie materialov [Strength of materials] / Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. Pod red. Aleksandrova A.V. – 4-e izd. ispr. – M.: Vysshaya shkola, 2004. – 560 s.
2. Belyakovskiy N.G. Konstruktivnaya amortizatsiya mekhanizmov, priborov i apparatury na sudakh [Structural depreciation of mechanisms, instruments and equipment on ships]. L.: Sudostroenie, 1965.
3. Minasyan A.M. Sozdanie i razvitie sredstv snizheniya vibroaktivnosti sudovykh dizel'-generatornykh agregatov [Creation and development of means of reducing vibration activity of marine diesel generator sets]. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. SPb. 2013, 201 s.
4. Polyakov V.S. Spravochnik po muftam [Coupling Reference] / Polyakov V.S., Barbash I.D., Ryakhovskiy O.A. // Pod red. Polyakova V.S. – L.: Mashinostroyeniye, 1979. – 344 s.
5. Rumb V. K. Konstruirovaniye i raschety prochnosti sudovykh valoprovodov [Design and calculation of the strength of ship shaft lines]: uchebnyk / Rumb V.K. // – SPb.: SPbGMTU, 2008. 298 s.
6. Ustroystvo dlya ispytaniya uprugikh muft [Device for testing elastic couplings]: pat. № 199499 MPK G01M 7/06/ avtory i zayavitel': Minasyan M.A., Minasyan A.M., Tszen Tszun'tsze, Le Khi Kha. Patentloobladatel' SPbGMTU. Zayavl. 24.03.2020; opubl. 03.09.2020, Byul. № 25. 7 s.
7. Li W. Online Identification and Verification of the Elastic Coupling Torsional Stiffness / Li W., Chai Z., Wang M., Hu X., Guo Y. // Hindawi Shock and Vibration. – 2016, Article ID 2016432. P. –7.
8. Microsoft Excel 2016 Tutorial /https://www.wiley.com/learn/moac/moac-series.html.
9. Shaowu Tu. Effect of Structure Parameters on Polycal Wire Rope Isolator Stiffness-Damping Characteristics/ Shaowu Tu, Xiaofeng Lu, and Xiaolei Zhu// Hindawi Shock and Vibration. – 2019, Article ID 4525798. P. –10.

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

Минасян Минас Арменакович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лотманская, 3, e-mail: mamsar@mail.ru

Минасян Армен Минасович, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий, 198262, Санкт-Петербург, пр. Ленинский, 101, e-mail: mamsar@mail.ru

Minas A. Minasyan, Dr. Sci (Eng), Professor, Professor of the Department of Ship Internal Combustion Engines and Diesel Engines, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, Saint-Petersburg, 190008, Russian Federation, e-mail: menos405@gmail.com

Armen M. Minasyan, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Computer Facilities and Information Technologies, Leninsky, 101, Saint-Petersburg, 198262, Russian Federation, e-mail: menos405@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 24.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.12.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 23.12.2023

Научная статья

УДК 621.825 (0131)

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.011>

Методика статических испытаний виброизоляторов MAMSar с упругими элементами из стального каната и полимерного композитного материала в качестве виброизолирующих муфт

Минасян М.А.¹ mamsar@mail.ru, Минасян А.М.¹ menos405@gmail.com¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Главная задача виброизолирующих муфт – обеспечить передачу крутящего момента на вал при одновременном уменьшении крутильной, продольной и поперечной составляющих вибрации. Однако, создание виброизолирующих муфт, эффективных по всем трем направлениям колебательных составляющих, является весьма сложной, но актуальной задачей. В представленной работе выдвинута и экспериментально-теоретически подтверждена гипотеза о возможности использования виброизолирующих опор «MAMSar» по новому назначению, а именно в качестве координатно-виброизолирующих муфт состыковываемых валов различных объектов техники.

Полученные по всем видам деформации (осевого сдвига, излома, радиального смещения и кручения) нагрузочные характеристики – гистерезисные петли, жесткости, коэффициенты демпфирования и поглощения как исследуемых муфт, так и отдельных упругих элементов позволяют проектировать и создать новые муфты. Следующая работа по данному направлению будет посвящена результатам экспериментальных исследований координатно-виброизолирующей эффективности двух опытных образцов нетрадиционных муфт системы «электродвигатель-поршневой компрессор».

Ключевые слова: муфты, канатные муфты, композитные муфты, координатные муфты, виброизолирующие муфты, жесткость, коэффициенты демпфирования и поглощения муфт.

Финансирование: Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030», Стратегического проекта №2 «Цифровая трансформация университета и промышленных предприятий на основе Интеллектуальной киберфизической платформы».

Для цитирования: Минасян М.А., Минасян А.М. Методика статических испытаний виброизоляторов MAMSar с упругими элементами из стального каната и полимерного композитного материала в качестве виброизолирующих муфт. Морские интеллектуальные технологии 2024. № 1 часть 1, С. 97—104. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.011

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.011>

Method for static testing of MAMSar vibration isolators with elastic elements from steel rope and polymer composite material as vibration isolating couplings

Minas A. Minasyan¹ mamsar@mail.ru, Armen M. Minasyan¹ menos405@gmail.com¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The main task of anti-vibration couplings is to ensure the transmission of torque to the shaft while reducing the torsional, longitudinal and transverse vibration components. However, the creation of vibration-isolating couplings that is effective in all three directions of the oscillatory components is a very difficult but urgent task. In the presented work, a hypothesis was put forward and experimentally-theoretically confirmed on the possibility of using vibration-isolating supports "MAMSar" for a new purpose, namely, as coordinate-vibration-isolating couplings for mating shafts of various technical objects.

Obtained load characteristics for all types of deformation (axial shear, fracture, radial displacement and torsion) - hysteresis loops, stiffness, damping and absorption coefficients of both the investigated couplings and individual elastic elements will allow designing and creating new couplings. The next work in this direction will be devoted to the results of experimental studies of the coordinate-vibration isolation efficiency of two prototypes of non-traditional couplings of the "electric motor-piston compressor" system.

Key words: couplings, rope couplings, composite couplings, coordinate couplings, anti-vibration couplings, stiffness, damping and absorption coefficients of couplings.

Financial Support: The work was carried out within the framework of the strategic academic leadership program "Priority 2030", Strategic Project No. 2 "Digital transformation of the University and industrial enterprises based on an Intelligent cyber-physical platform".

For citation: Minas A. Minasyan, Armen M. Minasyan, Method for static testing of MAMSar vibration isolators with elastic elements from steel rope and polymer composite material as vibration isolating couplings. Marine intellectual technologies 2024. № 1 part 1, P. 97—104. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.011

1. Объект, объем, гипотеза, цель и задачи исследования в рамках методики

Объектом исследования являются нетрадиционные опорные и неопорные виброизолирующие крепления MAMSar с упругими элементами из стального каната и полимерного композитного материала в качестве виброизолирующих муфт (рис. 1).

Объем экспериментальных исследований охватывает все виды смещений (рис. 2), т.е. кручение по направлению (Мк+) и против (Мк-) направления свивки каната, осевое смещение Δx (сдвиг), $\Delta \varphi$ - угловое смещение (излом) и Δr - радиальное смещение Δy виброизолирующих муфт (рис. 2).

Гипотеза методики статических испытаний полимерного композитного и канатных виброизоляторов MAMSar заключается в возможности применения их по новому назначению, а именно в качестве координатно-виброизолирующих муфт стыкуемых валов в системах «двигатель-валопровод-движитель», «дизель-генератор», «электродвигатель-поршневой компрессор» и т.п.

Целью статических испытаний виброизоляторов MAMSar по новому назначению в качестве координатно-виброизолирующих эффективных по всем направлениям колебательных составляющих муфт является определение их жесткостей, коэффициентов демпфирования и поглощения на основе экспериментально полученных нагрузочных характеристик на кручение, сдвиг, излом и осевое перемещение, с последующим выбором соответствующих образцов для экспериментальных исследований эффективности их виброизоляции в системе «электродвигатель-поршневой компрессор» с различными вариантами опорной амортизации.

Задачи исследования:

1. Разработать специальные устройства и приспособления в условиях лаборатории (рис. 2).

2. Провести статические испытания на кручение, сдвиг, излом и осевое перемещение гиперболических канатных опор MAMSar (рис. 1) в качестве отдельных (рис. 2, а, б, г-н) или сборных (рис. 2, д, е) муфт, а также муфт с композитными упругими элементами (Рис. 2, ф, о, р).

2.1. Провести три испытания без регистрации результатов для достижения стабильности структуры каната.

2.2. Провести последующие испытания (четвертое, пятое и шестое) с регистрацией результатов.

2.3. Проверить и убедиться, что полученные результаты одинаковые.

2.4. По результатам шестого испытания построить нагрузочную характеристику – петлю гистерезиса (рис. 3-5).

3. Определить жесткости, коэффициенты демпфирования и поглощения муфт (табл. 1).

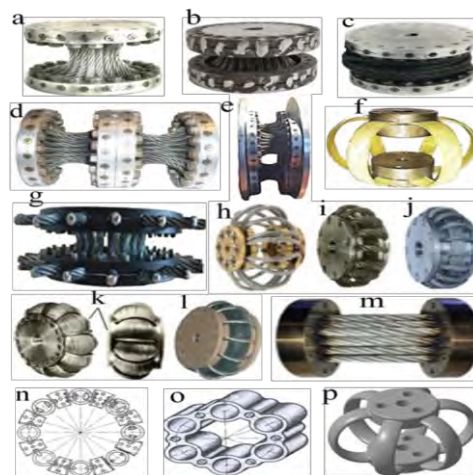


Рис. 1. Нетрадиционные муфты MAMSAR с упругими элементами из стальных канатов (а-е, г-к, м) и колец (n) торообразных (l) каната и резины, полимерных композитных материалов (f, o, p)

2. Статические нагрузочные характеристики, жесткости, коэффициенты демпфирования и поглощения муфт

2.1. Гиперболическая канатная муфта (ГКМ)

Блок-схема определения жесткости, коэффициентов демпфирования и поглощения представлена на рис. 3.

Крутильная жесткость ГКМ [(1)]:

$$C = \frac{M}{\varphi_{\text{ср}}} = \frac{2xM}{\varphi_{\text{min}} + \varphi_{\text{max}}} = \frac{2x1,5}{0,126 + 0,230} = 8,43 \text{ Н.м}, \quad (1)$$

где $M = 1,5 \text{ (Н·м)}$; $\varphi_{\text{min}} = 0,126 \text{ (рад)}$, $\varphi_{\text{max}} = 0,230 \text{ (рад)}$.

Коэффициент демпфирования гиперболической канатной муфты определяется с помощью приложения Microsoft Excel [6]. Для кривых нагружения и разгружения уравнения имеют вид:

$$y_n = 3,3x^2 + 11x + 0,05, \quad (2)$$

$$y_p = 52x^2 - 6,8x + 0,3. \quad (3)$$

Площади петли гистерезиса (рис. 4, а):

$$S_{\text{OABEO}} = \int_0^{0,342} (3,3x^2 + 11x + 0,05) dx = 0,704, \quad (4)$$

$$S_{\text{DCBED}} = \int_{0,079}^{0,342} (52x^2 - 6,8x + 0,3) dx = 0,387 \quad (5)$$

$$S_{\text{OABCDO}} = 0,704 - 0,387 = 0,317 \quad (6)$$

Коэффициент демпфирования ГКМ:

$$\psi = \frac{S_{\text{OABCDO}}}{S_{\text{OABEO}}} = \frac{0,317}{0,704} = 0,45. \quad (7)$$

Коэффициент поглощения:

$$\Phi = 2\pi\psi = 2x3,14x0,45 = 2,827 \quad (8)$$

Статическое испытание ГКМ на осевое Δx , угловое $\Delta \varphi$ и радиальное Δy смещения представлены соответственно на рис. 4 (б, с, д), значения жесткостей, коэффициентов демпфирования и поглощения – в табл. 1.

2.2. Полимерная композитная муфта (ПКМ)

Экспериментально полученная нагрузочная характеристика при кручении ПКМ (рис. 1, ф, р; 2, т) представлена на рис. 4, а.

Крутильная жесткость:

$$C = \frac{M}{\varphi_{\text{ср}}} = \frac{2xM}{\varphi_{\text{min}} + \varphi_{\text{max}}} = \frac{2x7,1}{0,126 + 0,218} = 41,28 \text{ Н.м},$$

где $M = 7,1 \text{ (Н·м)}$; $\varphi_{\text{min}} = 0,148 \text{ (рад)}$, $\varphi_{\text{max}} = 0,218 \text{ (рад)}$

Уравнения для кривой нагружения и разгрузки
[6]:

$$y_n = 40x^2 + 42,6x - 0,01,$$

$$y_p = 166x^2 - 2,5x - 0,41.$$

Площади петли гистерезиса (рис. 4, а)

$$S_{OABEO} = \int_0^{0,35} (40x^2 + 42,6x - 0,01) dx = 3,18$$

$$S_{DCBED} = \int_{0,07}^{0,35} (166x^2 - 2,5x - 0,41) dx = 2,09$$

$$S_{OABCD} = 3,18 - 2,09 = 1,09$$

Коэффициенты демпфирования и поглощения
(рис. 2, а, 6, d) (10):

$$\psi = \frac{S_{OABCD}}{S_{OABEO}} = \frac{1,09}{3,18} = 0,34,$$

$$\Phi = 2\pi\psi = 2 \times 3,14 \times 0,34 = 2,15.$$



Рис. 2. Композитная (q - t) и канатные (а - р) муфты MAMSAR со средствами статических испытаний на осевой сдвиг, излом, радиальное смещение и кручение

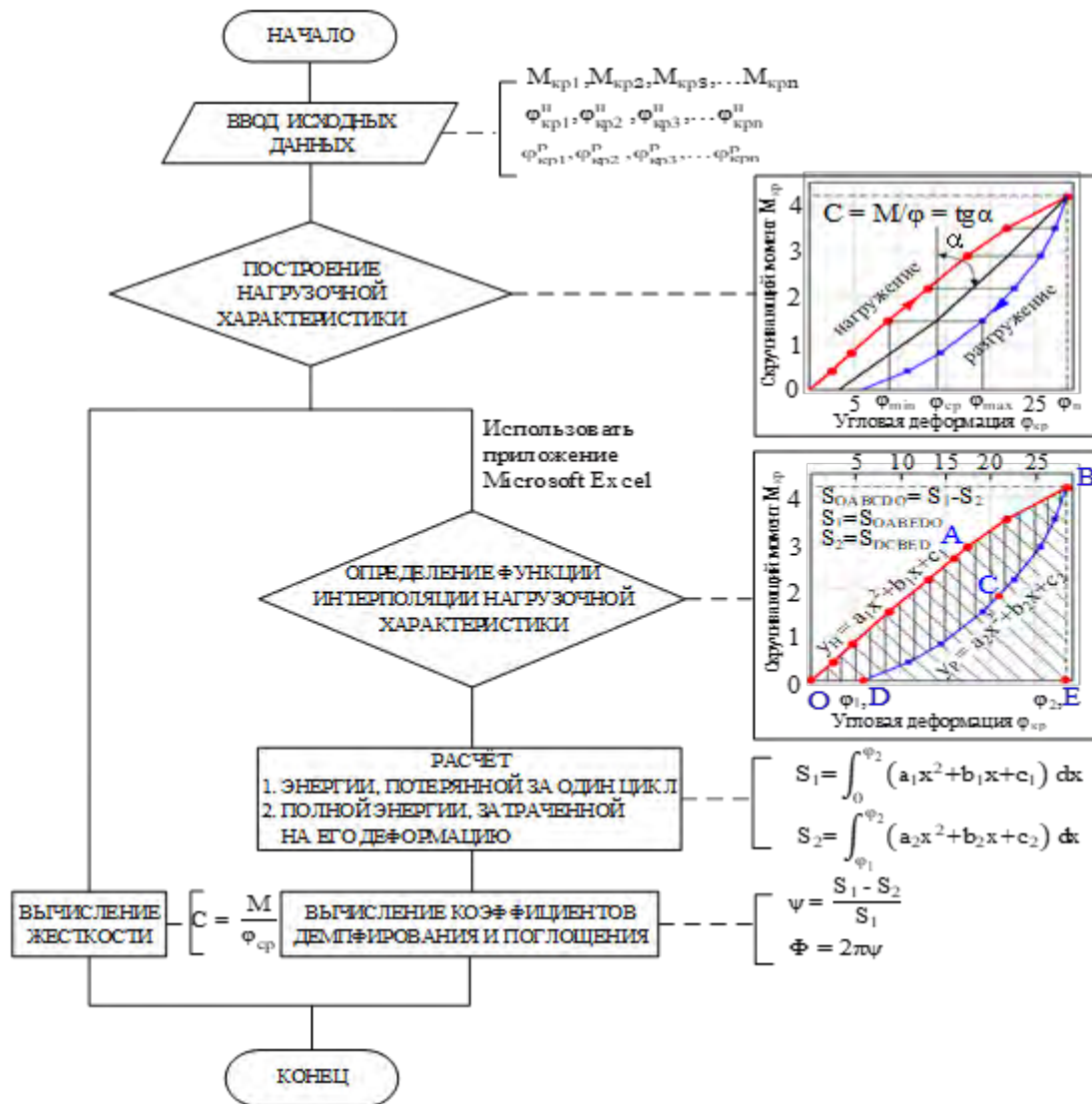


Рис. 3. Блок-схема определения жесткости, коэффициентов демпфирования и поглощения муфт

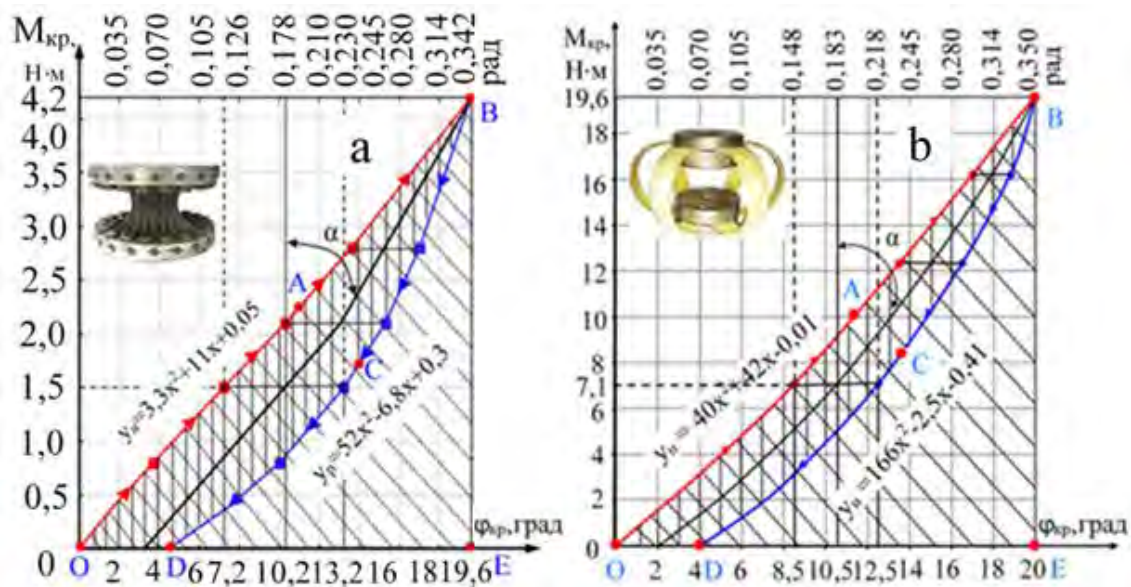


Рис. 4. Нагрузочные характеристики ГК (а) ПК (б) муфт на кручение

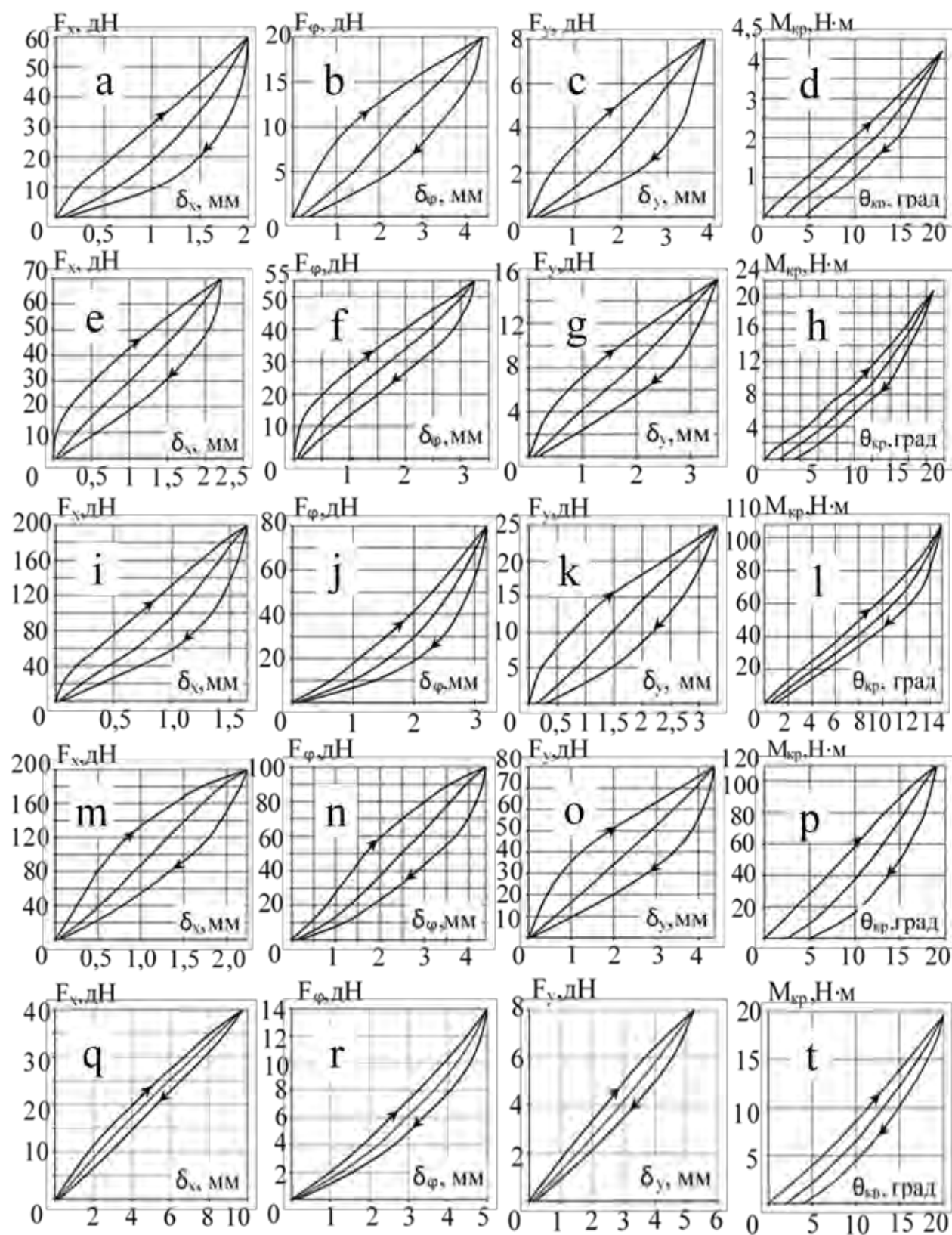


Рис. 5. Нагрузочные характеристики всех видов деформации (рис. 2): осевого сдвига, излома, радиального смещения и кручения нетрадиционных муфт с упругими элементами из стального каната (а-р) и полимерного композитного материала (q-t)

Таблица 1

Характеристики муфт

Рис.5	Кручение			
	$M_{кр}, Н·м$	$C_{\partial}, Н·м$	ψ	Φ
		$e, Н^{-1}·м^{-1}$		
b	20,7	40,7 $2,46 \cdot 10^{-2}$	0,35	2,21
d	3,1	3,37 $29,67 \cdot 10^{-2}$	0,60	3,78
e	108	$2,85 \cdot 10^2$ $35,1 \cdot 10^{-4}$	0,28	1,75
f	19,6	41,28 $2,42 \cdot 10^{-2}$	0,34	2,15
g	110	$2,31 \cdot 10^2$ $43,29 \cdot 10^{-4}$	0,53	3,35
Рис.5	Угловое смещение			
	$F_{\phi}, \partial H$	$C_{\partial}, Н·мм$	ψ	Φ
		$e, Н^{-1}·мм^{-1}$		
a	8	$0,17 \cdot 10^2$ $5,88 \cdot 10^{-2}$	0,64	4,0
b	16	$0,42 \cdot 10^2$ $2,38 \cdot 10^{-2}$	0,46	2,9
e	25	$0,73 \cdot 10^2$ $1,37 \cdot 10^{-2}$	0,50	3,1
f	8	$0,14 \cdot 10^2$ $7,14 \cdot 10^{-2}$	0,24	1,5
g	80	$1,72 \cdot 10^2$ $58,14 \cdot 10^{-4}$	0,50	3,2
Рис.5	Осевое смещение			
	$F_x, \partial H$	$C_{\partial}, Н·мм$	ψ	Φ
		$e, Н^{-1}·мм^{-1}$		
a	60	$2,21 \cdot 10^2$ $45,25 \cdot 10^{-4}$	0,61	3,8
b	70	$2,98 \cdot 10^2$ $33,55 \cdot 10^{-4}$	0,66	4, 1
e	200	$9,69 \cdot 10^2$ $10,32 \cdot 10^{-4}$	0,50	3,1
f	40	$0,43 \cdot 10^2$ $2,33 \cdot 10^{-2}$	0,16	1,0
g	200	$8,93 \cdot 10^2$ $11,2 \cdot 10^{-4}$	0,33	2,1
Рис.5	Радиальное смещение			
	$F_y, \partial H$	$C_{\partial}, Н·мм$	ψ	Φ
		$e, Н^{-1}·мм^{-1}$		
a	20	$0,43 \cdot 10^2$ $2,33 \cdot 10^{-2}$	0,54	3,4
b	55	$2,33 \cdot 10^2$ $42,92 \cdot 10^{-4}$	0,35	2,2
e	80	$1,71 \cdot 10^2$ $58,48 \cdot 10^{-4}$	0,53	3,3
f	14	$0,2 \cdot 10^2$ $5 \cdot 10^{-2}$	0,27	1,7
g	100	$2,02 \cdot 10^2$ $58,14 \cdot 10^{-4}$	0,46	3,0

Литература

1. G. Tuzzi. Study of coupling between shaft bending and disc zero nodal diameter modes in a flexible shaft-disc assembly / G.Tuzzi, C.W.Schwingshackl, J.S. Green // Journal of Sound and Vibration – 2020. Vol. 479. P.1–20.
2. Han H.S. Experimental verification for lateral-torsional coupled vibration of the propulsion shaft system in a ship / HyungSuk Han, KyoungHyun Lee // Engineering Failure Analysis – 2019. Vol. 104. P. 758–771.
3. Hongxian Z. Spectrum Analysis of a Coaxial Dual-Rotor System with Coupling Misalignment / Hongxian Z., Liangpei H., Xuejun L., Lingli J., Dalian Y., Fanyu Z., Jiang M. // Hindawi Shock and Vibration. – 2019. Article ID 5856341. P. –19.
4. Hung Q. Investigation of Lumped-Mass Method on Coupled Torsional-longitudinal Vibrations for a Marine Propulsion Shaft with Impact Factors / Huang Q., Liu H., Cao J. // Journal of Marine Science and Engineering – 2019. Vol. 7 N.4. P. 95–111.

Статическое испытание ПК муфты на осевое Δx , угловое $\Delta \phi$ и радиальное Δy смещения представлены соответственно на рис. 4, b, c, d), значения жесткостей, коэффициентов демпфирования и поглощения – в табл. 1.

Обобщенно-итоговые характеристики всех видов деформаций (рис. 2, 4, 5) муфт (рис. 1) представлены в таблице 1.

Закключение

1. Экспериментально полученные по всем видам деформации (осевого сдвига, излома, радиального смещения и кручения) нагрузочные характеристики – гистерезисные петли муфт (рис. 4, 5) с упругими элементами из стального каната и полимерного композитного материала подтверждают гипотезу о возможности применения виброизоляторов MAMsag по новому назначению, а именно в качестве координатно-виброизолирующих муфт стыкуемых валов в системах «двигатель-валопровод-двигатель», «дизель-генератор», «электродвигатель-поршневой компрессор» и т.п.

2. Экспериментально полученные результаты показывают, что одним из возможных путей решения задачи – создание виброизолирующих муфт, эффективных по всем трем направлениям колебательных составляющих – является использование оригинальных конструкций виброизолирующих муфт с нетрадиционным упругими элементами, например, из стального каната, полимерного композитного материала и т. п.

3. Крутящие моменты, жесткости, коэффициенты демпфирования и поглощения всех дугообразных упругих элементов в дальнейшем будут использованы для проектирования и создания новых опытных образцов с целью определения эффективности их виброизоляции в составе дизель-генераторного агрегата ДГА-8,83 с дизелем 2Ч 8,5/11, а также двухцилиндрового поршневого компрессора с приводным электродвигателем.

5. Jabbar F. Vibration Equations of The Coupled Torsional, Longitudinal, And Lateral Vibrations of The Propeller Shaft at The Ship Stern / Jabbar F., Hassan G., Karim A.V. // Scientific Journals. – 2020. Vol. 61. P. 121–129.
6. Jiang S. Nonlinear Torsional Vibration Analysis and Control of Semidirect Electromechanical Coupling Transmission System in Shearer / Song Jiang, Wei Li, Lianchao Sheng, Jiajun Chen, Min Li // Hindawi Shock and Vibration. – 2019. Article ID: 7431239. P. –12.
7. Li, Bing. Optimization an analysis of structural parameters of wire rope coupling / Li Bing. Dongqiang Gao. Tianyi Li. // Coal Mine Machinery. – 2015. Vol. 7. – P. 198–200.
8. Troy Feese. Prevention of torsional vibration problems in reciprocating machinery / Troy Feese, Charles Hill // Texas A&M University. – 2009. P. 213–238.
9. Wen Huabing. Research on the vibration transmission characteristics of the high-elastic coupling / Wen Huabing, Zhong Qidong // School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University of Science and Technology. – 2015. Vol. 29, N 3. – P. 251–255.
10. Yanan Hu. Wire Rope Coupling Vibration Characteristics Analysis Based on Workbench / Huiping Feng, Huijuan Zhao // 7th International Conference on Education, Management, Information and Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 76, – P. 1268–1231.
11. Microsoft Excel 2016 Tutorial / <https://www.wiley.com/learn/moac/moac-series.html>.
12. Минасян М.А. Амортизация судовых дизельных энергитических установок. / Минасян М.А., Минасян А.М.-СПБ.: Изд-во СПбГМТУ, 2017. -360 с.
13. Муфта: пат. RU 137585 U1 Рос. Федерация: МПК F16F 7/14 / Минасян М. А., Минасян А. М., заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО СПбГМТУ. - № 2013144746/11; заявл. 04.10.13 ; опубл. 20.02.14, Бюл. № 5. – 11 с.
14. Муфта: пат. № 2658208 МПК F16D 3/72 / М.А. Минасян, А.М. Минасян, Цзэн Цзюньцзе. Патентообладатель СПбГМТУ. Заявл. 28.02.2017; опубл. 19.06.2018, Бюл. № 17. 10 с.
15. Поляков В.С. Справочник по муфтам / Поляков В.С, Барбаш И.Д, Ряховский О.А. // Под ред. Полякова В.С. – Л.: Машиностроение, 1979. – 344с.
16. Способ реализации опорной и неопорной амортизации судовой электростанции с виброактивным дизельным приводом: пат. № 2730696 МПК B63H 21/30, F16F 7/14/ М.А. Минасян, А.М. Минасян, Цзэн Цзюньцзе, Лэ Хи Ха. Патентообладатель СПбГМТУ. Заявл. 15.07.2019; опубл. 25.08.2020, Бюл. № 24. 11.
17. Способ определения коэффициента эффективности вибрационной защиты виброизолирующих муфт судовых дизель-генераторов: пат. № 2730694 МПК B63H 21/30/ М.А. Минасян, А.М. Минасян, Цзэн Цзюньцзе, Лэ Хи Ха. Патентообладатель СПбГМТУ. Заявл. 06.11.2019; опубл. 25.08.2020, Бюл. № 24. 12 с.
18. Устройство для испытания упругих муфт: пат. № 199499 МПК G01M 7/06/ М.А. Минасян, А.М. Минасян, Цзэн Цзюньцзе, Лэ Хи Ха. Патентообладатель СПбГМТУ. Заявл. 24.03.2020; опубл. 03.09.2020, Бюл. № 25. 7 с.

References

1. G. Tuzzi. Study of coupling between shaft bending and disc zero nodal diameter modes in a flexible shaft-disc assembly / G.Tuzzi, C.W.Schwingshackl, J.S. Green // Journal of Sound and Vibration – 2020. Vol. 479. P.1–20.
2. Han H.S. Experimental verification for lateral-torsional coupled vibration of the propulsion shaft system in a ship / HyungSuk Han, KyoungHyun Lee // Engineering Failure Analysis – 2019. Vol. 104. P. 758–771.
3. Hongxian Z. Spectrum Analysis of a Coaxial Dual-Rotor System with Coupling Misalignment / Hongxian Z., Liangpei H., Xuejun L., Lingli J., Dalian Y., Fanyu Z., Jiang M. // Hindawi Shock and Vibration. – 2019. Article ID 5856341. P. –19.
4. Hung Q. Investigation of Lumped-Mass Method on Coupled Torsional-longitudinal Vibrations for a Marine Propulsion Shaft with Impact Factors / Huang Q., Liu H., Cao J. // Journal of Marine Science and Engineering – 2019. Vol. 7 N.4. P. 95–111.
5. Jabbar F. Vibration Equations of The Coupled Torsional, Longitudinal, And Lateral Vibrations of The Propeller Shaft at The Ship Stern / Jabbar F., Hassan G., Karim A.V. // Scientific Journals. – 2020. Vol. 61. P. 121–129.
6. Jiang S. Nonlinear Torsional Vibration Analysis and Control of Semidirect Electromechanical Coupling Transmission System in Shearer / Song Jiang, Wei Li, Lianchao Sheng, Jiajun Chen, Min Li // Hindawi Shock and Vibration. – 2019. Article ID: 7431239. P. –12.
7. Li, Bing. Optimization an analysis of structural parameters of wire rope coupling / Li Bing. Dongqiang Gao. Tianyi Li. // Coal Mine Machinery. – 2015. Vol. 7. – P. 198–200.
8. Troy Feese. Prevention of torsional vibration problems in reciprocating machinery / Troy Feese, Charles Hill // Texas A&M University. – 2009. P. 213–238.
9. Wen Huabing. Research on the vibration transmission characteristics of the high-elastic coupling / Wen Huabing, Zhong Qidong // School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University of Science and Technology. – 2015. Vol. 29, N 3. – P. 251–255.
10. Yanan Hu. Wire Rope Coupling Vibration Characteristics Analysis Based on Workbench / Huiping Feng, Huijuan Zhao // 7th International Conference on Education, Management, Information and Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 76, – P. 1268–1231.
11. Microsoft Excel 2016 Tutorial / <https://www.wiley.com/learn/moac/moac-series.html>.
12. Minasyan M.A. Amortizatsiya sudovykh dizel'nykh energiticheskikh ustanovok [Depreciation of marine diesel power plants] / Minasyan M.A., Minasyan A.M. – SPB.: Izd-vo SPbGMTU, 2017. 360 s.
13. Coupling: Pat. RU 137585 U1 Ros. Federation: MPK F16F 7/14 / Minasyan M. A., Minasyan A. M.; applicant and patent holder GOU VPO SPbGMTU. - No. 2013144746/11; dec. 04.10.13; publ. 20.02.14, Bull. No. 5. - 11 p.

14. Mufta [Coupling]: pat. RU 137585 U1 Ros. Federatsiya: MPK F16F 7/14 / Minasyan M. A., Minasyan A. M., заявитель i патентообладатель GOU VPO SPbGMTU. - № 2013144746/11; заявл. 04.10.13 ; opubl. 20.02.14, Byul. № 5. – 11 s.
15. Polyakov V.S. Spravochnik po muftam [Coupling Reference] / Polyakov V.S, Barbash I.D, Ryakhovskiy O.A. // Pod red. Polyakova V.S. – L.: Mashinostroenie, 1979. – 344 s.
16. Sposob realizatsii opornoy i neopornoy amortizatsii sudovoy elektrostantsii s vibroaktivnym dizel'nym privodom [A method for implementing the support and non-support depreciation of a ship power plant with a vibroactive diesel drive]: pat. № 2730696 MPK B63H 21/30, F16F 7/14/ M.A. Minasyan, A.M. Minasyan, Tszen Tszun'tsze, Le Khi Kha. Patentobladatel' SPbGMTU. Zayavl. 15.07.2019; opubl. 25.08.2020, Byul. № 24. 11.
17. Sposob opredeleniya koeffitsienta effektivnosti vibratsionnoy zashchity vibroizoliruyushchikh muft sudovykh dizel'-generatorov [Method for determining the efficiency coefficient of vibration protection of vibration-isolating couplings of marine diesel generators]: pat. № 2730694 MPK B63H 21/30/ M.A. Minasyan, A.M. Minasyan, Tszen Tszun'tsze, Le Khi Kha. Patentobladatel' SPbGMTU. Zayavl. 06.11.2019; opubl. 25.08.2020, Byul. № 24. 12 s.
18. Ustroystvo dlya ispytaniya uprugikh muft [Device for testing elastic couplings]: pat. № 199499 MPK G01M 7/06/ M.A. Minasyan, A.M. Minasyan, Tszen Tszun'tsze, Le Khi Kha. Patentobladatel' SPbGMTU. Zayavl. 24.03.2020; opubl. 03.09.2020, Byul. № 25. 7 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

Минасян Минас Арменакович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: mamsar@mail.ru

Minas A. Minasyan, Dr. Sci (Eng), Professor, Professor of the Department of Ship Internal Combustion Engines and Diesel Engines, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, Saint-Petersburg, 190008, Russian Federation, e-mail: menos405@gmail.com

Минасян Армен Минасович, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий, 198262, Санкт-Петербург, пр. Ленинский, 101, e-mail: mamsar@mail.ru

Armen M. Minasyan, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Computer Facilities and Information Technologies, Leninsky, 101, Saint-Petersburg, 198262, Russian Federation, e-mail: menos405@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 24.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.01.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 28.01.2024.

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.012>

Система аварийного расхолаживания

Гоняева С.С.¹ sofya.gonyaeva@yandex.ru, Кожемякин В.В.¹ kogh2022@mail.ru,
Кожемякин В.О.¹ kozhemiakinvlad@gmail.com, Морозов Н.А.¹ nikita.morozov99@mail.ru,
Николаева С.А.¹ vladimir.kalashnikov01@yandex.ru, Аполлова А.В.¹ an.vas.petrova@gmail.com.

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Работа посвящена разработке системы пассивного отвода теплоты от реактора, способной обеспечить штатное и аварийное расхолаживание реактора, а также обеспечить работу установки на малых мощностях реактора без участия паротурбинной установки. Обеспечить циркуляцию теплоносителя в этой системе предложено с помощью пароводяных струйных аппаратов с дозвуковым паровым соплом, аналогичных ранее разрабатывавшимся для интегрального реактора «Бета». Системы с подобными струйными аппаратами склонны к пульсации параметров из-за срывов и перезапусков пароводяных струйных аппаратов. В виду этого, была предложена конфигурация системы, позволяющая регулировать подводимую парогенератором и отводимую заборным теплообменником мощность, исключая тем самым пульсации в системе и срывы пароводяного струйного аппарата. Байпасирование парогенератора позволяет не допустить выдачу слишком влажного пара в систему.

Ключевые слова: система пассивного отвода теплоты, пароводяной струйный аппарат, реакторная установка, расхолаживание, байпасирование.

Для цитирования: Гоняева С.С., Кожемякин В.В., Кожемякин В.О., Морозов Н.А., Николаева С.А., Аполлова А.В. Система аварийного расхолаживания, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 105—109. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.012

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.012>

Emergency core cooling systems

Sofya S. Gonyaeva¹ sofja.gonyaeva@yandex.ru, Vyacheslav V. Kozhemyakin¹ kogh2012@yandex.ru,
Vladimir O. Kozhemyakin¹ kozhemiakinvlad@gmail.com, Nikita A. Morozov¹ nikita.morizov99@mail.ru,
Sofya A. Nikolaeva¹ vladimir.kalashnikov01@yandex.ru, Anastasia V. Apollova¹ an.vas.petrova@gmail.com

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. Paper is devoted to the development of a system for passive heat removal from the reactor, capable of providing normal and emergency cooldown of the reactor, as well as ensuring the operation of the plant at low reactor power without the participation of a steam turbine plant. It is proposed to ensure the circulation of the coolant in this system using steam-water jet apparatus with a subsonic steam nozzle, similar to those previously developed for the type «Beta» integral reactor. Systems with such jet apparatuses are prone to parameter pulsation due to breakdowns and restarts of steam-water jet apparatuses. Taking this in consideration a system configuration was proposed that makes it possible to regulate the power supplied by the steam generator and removed by the outboard heat exchanger, thereby excluding pulsations in the system and disruptions of the steam-water jet apparatus. Bypassing the steam generator prevents too wet steam from being released into the system.

Key words: passive heat removal system, steam-water jet apparatus, reactor plant, cooling down, bypassing.

For citation: Sofya S. Gonyaeva, Vyacheslav V. Kozhemyakin, Vladimir O. Kozhemyakin, Nikita A. Morozov, Sofya A. Nikolaeva, Anastasia V. Apollova, Emergency core cooling systems, Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 105—109. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.012

Введение

Одной из важнейших задач обеспечения безопасности реакторных установок является создание систем пассивного отвода остаточного тепловыделения от реактора и, прежде всего, систем аварийного расхолаживания (САР). Наиболее существенные требования к таким системам – они должны работать неопределенно долго и не требовать дополнительных источников энергии, то есть должны работать за счет отводимой теплоты.

По второму закону термодинамики отводимую от реактора к окружающей среде теплоту можно частично преобразовать в работу по перемещению теплоносителя в САР. Это преобразование теплоты

в работу можно осуществить двумя путями: с помощью естественной циркуляции или с помощью пароводяных инжекторов.

Для того чтобы обеспечить в САР естественную циркуляцию теплоносителя нужен высоко расположенный охладитель, то есть теплообменник, охлаждаемый атмосферным воздухом. Однако такие САР имеют серьезные недостатки и, прежде всего, сложности обеспечения работоспособности воздушного теплообменника в условиях низких температур.

САР с пароводяным инжектором обеспечивает передачу теплоты заборной воде, однако традиционные пароводяные инжекторы со сверхзвуковым паровым соплом из-за большого

расхода пара принципиально не подходят для работы в САР.

В качестве циркуляционного средства в САР может быть использован пароводяной струйный аппарат (ПВСА), созданный для интегрального реактора «Бета» [1]. Особенностью такого ПВСА является особая форма проточной части и дозвуковое паровое сопло.

Работа этого ПВСА была изучена теоретически [2-4] и экспериментально [5, 6]. Исследования показали, что такой ПВСА может создавать напор при высоких значениях давления и коэффициента инжекции. Кафедра судовой ядерной и водородной энергетики СПбГМТУ активно работает над разработкой систем аварийного расхолаживания с ПВСА.

В 2018 году на Приморской учебно-научной базе СПбГМТУ на базе универсального испытательного стенда «Бета-К» был создан стенд «Бета-К-ТСН» для проведения экспериментальных исследований масштабных макетов САР с ПВСА [7,8,10]. Благодаря блочной структуре стенда, без переделки стенда были испытаны 11 схем САР. Наиболее удачной была признана схема «Макет-2», она представлена на рисунке 1. При подключении к ПГ, без вмешательства оператора автоматически запускается ПВСА. При снижении подводимой мощности происходит срыв ПВСА, и через некоторое время происходит автоматический перезапуск ПВСА.

Испытания подтвердили работоспособность САР с ПВСА. Также установлено, что такие САР можно использовать не только при аварийном расхолаживании РУ (в том числе при полном обесточивании), но и при штатном расхолаживании. Кроме того, САР с ПВСА могут обеспечивать работу реактора на малой мощности без участия паротурбинной установки.

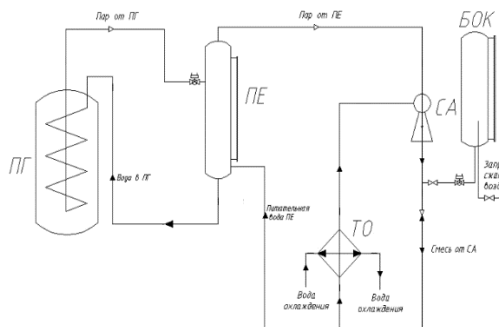


Рис. 1. Система аварийного расхолаживания с ПВСА «Макет-2»

1. Разработка системы аварийного расхолаживания

Испытанные на стенде «Бета-К-ТСН» системы имели общий недостаток – постоянные срывы и перезапуски ПВСА приводят к пульсации параметров.

Поэтому кафедра судовой ядерной и водородной энергетики параллельно с экспериментальными исследованиями пульсирующих САР разрабатывала неп пульсирующие САР [9].

Установлено, что основными причинами пульсаций является дисбаланс между мощностью, подводимой в парогенераторе, мощностью, отводимой в заборном теплообменном аппарате, и

мощностью, передаваемой ПВСА, а также, снижение паросодержания на выходе из парогенератора.

За основу неп пульсирующей САР была взята схема первого контура с ПВСА – первого контура интегрального реактора «Бета», приведенная на рисунке 2.

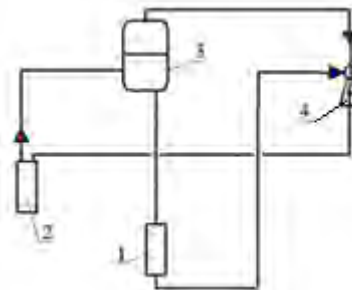


Рис. 2. Схема первого контура интегрального реактора «Бета»: 1 – заборный теплообменник, 2 – парогенератор, 3 – компенсирующая емкость, 4 – пароводяной струйный аппарат

Первый контур интегрального реактора «Бета» обладает в высокой степени саморегулированием. Но это определяется саморегулированием водоводяной активной зоны – мощность водоводяной активной зоны устанавливается равной мощности парогенератора. При равенстве мощности, подводимой в активной зоне, и мощности, отводимой в парогенераторе, устанавливается соответствующий расход ПВСА. Однако ПВСА могут работать в достаточно узком диапазоне параметров. Для того, чтобы увеличить диапазон по расходу в первом контуре устанавливается несколько ПВСА – обычно 32 ПВСА.

В САР обратная связь действует принципиально иначе. При снижении мощности, подводимой в парогенераторе, температура воды на выходе из заборного теплообменника (ЗТО) будет снижаться, что вызовет увеличение расхода ПВСА.

В первом контуре срыв ПВСА происходит из-за недостатка напора ПВСА – так называемый срыв по горячей воде. После срыва одного из ПВСА, условия работы остальных работающих ПВСА улучшаются. Расчетно-теоретические исследования [9] показали, что в САР происходит срыв ПВСА по холодной воде. Если в САР установлено несколько ПВСА, то срыв одного из них по холодной воде приведет к ухудшению условий работы и немедленному срыву остальных работающих ПВСА.

Чтобы обеспечить устойчивую работу системы, необходимо обеспечить регулирование мощности, отводимой в ЗТО, и мощности, передаваемой ПВСА. Мощность, отводимая в ЗТО, зависит от температурного напора в ЗТО. Мощность, передаваемая ПВСА, зависит, в частности, от температуры воды на входе в водяное сопло.

Поэтому проблему со срывом ПВСА можно решить, если в САР установить несколько перемычек с размещенными на них регулируемыми клапанами, которые будут регулировать температуру теплоносителя на входе в ЗТО и температуру теплоносителя, поступающего в водяное сопло ПВСА. Такая САР представлена на рисунке 3.

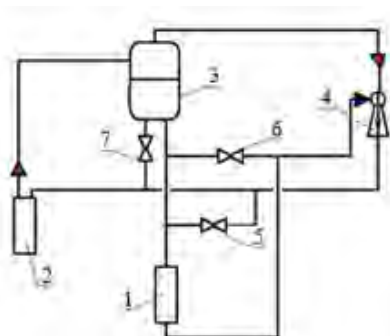


Рис. 3. САР с переключателями: 1 – заборный теплообменник, 2 – парогенератор, 3 – компенсирующая емкость, 4 – пароводяной струйный аппарат, 5-7 – переключики

Переключика с размещенным на ней регулирующим клапаном 5 устанавливается для возможности уменьшения температуры воды, подаваемой на ЗТО. Это позволяет регулировать температурный напор на заборном теплообменнике, и, тем самым, регулировать отводимую мощность.

Регулировать мощность, передаваемую ПВСА, можно только одним способом – изменением температуры воды на входе в ПВСА. Это можно сделать с помощью переключики с установленным на ней регулирующим клапаном 6.

Переключика с установленным на ней регулирующим клапаном 7 позволяет поддерживать нужное для работы ПВСА паросодержание на выходе из парогенератора.

Затраты на электропитание системы управления арматурой и приводов арматуры несоизмеримо меньше затрат энергии на циркуляцию теплоносителя в САР, поэтому для обеспечения их энергией можно использовать аккумуляторную батарею.

2. Запуск системы аварийного расхолаживания

Запуск ПВСА можно осуществить с помощью пусковой емкости 8 и невозвратного клапана 11, показанных на рисунке 4.

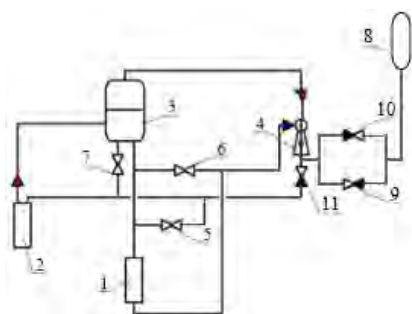


Рис. 4. САР с пусковой емкостью: 1 – заборный теплообменник, 2 – парогенератор, 3 – компенсирующая емкость, 4 – пароводяной струйный аппарат, 5-7 – переключики, 8 – пусковая емкость, 9 – невозвратный магнитный клапан, 10, 11 – невозвратные клапаны

Исходное состояние системы: система частично заполнена водой, пусковая емкость и компенсирующая емкость над уровнем воды заполнены воздухом, при давлении близком к

атмосферному, температура воды и воздуха равна температуре окружающей среды.

При подключении САР к парогенератору со стороны второго контура, пар из парогенератора через компенсирующую емкость 3, где смешивается с воздухом, поступает на паровое сопло ПВСА. Одновременно пар выдавливает из компенсирующей емкости 3 воду, которая через ЗТО 1 поступает на водяное сопло ПВСА. Далее пар, воздух и вода направляются в пусковую емкость 8. При этом воздух из компенсирующей емкости выдавливается в пусковую емкость, в которой повышается давление. Одновременно происходит запуск ПВСА. Когда выравниваются давления в системе и пусковой емкости, ПВСА начинает создавать напор, открывается невозвратный клапан 11, и САР начинает работать.

3. Срыв и перезапуск ПВСА

Остаточное тепловыделение снижается, и неизбежно наступит момент, когда парогенератор перестанет генерировать достаточное для работы ПВСА количество пара и произойдет срыв ПВСА. Поэтому в САР установлены невозвратные клапаны 9, 10, которые обеспечивают перезапуск ПВСА [11].

Сразу после подключения к парогенератору в системе устанавливается повышенное давление. При снижении мощности остаточного тепловыделения температура и давление в системе снижаются, и вода из пусковой емкости через клапан 10 возвращается в контур.

После срыва ПВСА прекращается циркуляция теплоносителя и, соответственно, отвод теплоты в ЗТО. После этого за счет остаточного тепловыделения начинается разогрев системы с соответствующим повышением давления.

Однако магнитный клапан 9, имеющий конструктивно заложенный перепад давления для открытия, препятствует выравниванию давления между контуром и пусковой емкостью. Только после достижения перепада давления, достаточного для запуска ПВСА, клапан открывается и обеспечит запуск.

Заключение

На основе экспериментальных исследований масштабных макетов предложена схема САР с ПВСА. Запуск ПВСА и перезапуск после срыва осуществляется автоматически без вмешательства оператора.

Установлено, что основными причинами срывов ПВСА является дисбаланс между мощностью, подводимой в парогенераторе, мощностью, отводимой в заборном теплообменном аппарате, и мощностью, передаваемой ПВСА.

Предложена схема непulseирующей САР, в которой переключики и установленные на них регулирующие клапаны позволяют регулировать отводимую в заборный теплообменник мощность и мощность, передаваемую ПВСА.

Затраты на электропитание системы управления арматурой и приводов арматуры несоизмеримо меньше затрат энергии на циркуляцию теплоносителя в САР, поэтому для обеспечения их энергией можно использовать аккумуляторную батарею.

Предложена система запуска с помощью пусковой емкости и группы невозвратных клапанов.

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. Игнатъева 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., Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Соломянский В.Б., Алексеев 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., Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Соломянский В.Б., Андреев А.Г., 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.П. 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 исследования 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. Квазистатистические характеристики системы пассивного отвода тепла. // Морские интеллектуальные технологии. 2019, №1 (43) т 3, с. 115-121.
10. Аполлова А.В., Шаманов Д.Н., Русаков Е.С. 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. Шаманов Д.Н., Рыльцов Н.А., Аполлова А.В., Аленичев О.Н., Андреев А.Г., Игнатъева Е.С., Гайсина А.О. Система пассивного отвода тепла реакторной установки: пат.2761108 / Заявитель и Патентообладатель СПбГМТУ; заявл 03.04.2020, опуб. 21.01.2021. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам Российской Федерации, 2021.

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 27.07.1998. 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 staticheskikh 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. Performance 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. Shamanov D.N., Ryl'tsov N.A., Apollova A.V., Alenichev O.N., Andreev A.G., Ignateva E.S., Gajsina A.O. Patent RU 2116522 C1. Applicant and patent holder SPBSMTU; filed 03.04.2020; published 21.01.2021. Federal service for Intellectual property, patents and trademarks of the Russian Federation, 2021.

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

Гоняева Софья Сергеевна, ассистент кафедры судовой ядерной и водородной энергетики, Санкт-

Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: sofja.gonyaeva@yandex.ru

Кожемякин Вячеслав Вячеславович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой судовой ядерной и водородной энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kogh2012@yandex.ru

Кожемякин Владимир Олегович, кандидат технических наук, доцент кафедры судовой ядерной и водородной энергетики Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kozhemiakinvlad@gmail.com

Морозов Никита Александрович, ассистент кафедры судовой ядерной и водородной энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: nikita.morizov99@mail.ru

Николаева Софья Алексеевна, студент группы 2263, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: vladimir.kalashnikov01@yandex.ru

Аполлова Васильевна Анастасия, кандидат технических наук, доцент кафедры судовой ядерной и водородной энергетики Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: an.vas.petrova@gmail.com.

Sofya S. Gonyaeva, assistant of department of ship nuclear and hydrogen energetics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: sofja.gonyaeva@yandex.ru

Vyacheslav V. Kozhemyakin, Dr. Sci. (Eng), Associate Professor, the head of department of ship nuclear and hydrogen energetics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kogh2012@yandex.ru

Vladimir O. Kozhemyakin, reader of department of ship nuclear and hydrogen energetics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kozhemiakinvlad@gmail.com

Nikita A. Morozov, assistant of department of ship nuclear and hydrogen energetics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: nikita.morizov99@mail.ru

Sofya A. Nikolaeva, student, group 2163, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: vladimir.kalashnikov01@yandex.ru

Anastasia V. Apollova, reader of department of ship nuclear and hydrogen energetics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: an.vas.petrova@gmail.com.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 22.11.2023.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 23.01.2024.
Принята к публикации/accepted for publication 02.02.2024.

Научная статья

УДК 629.12

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.013>**Оценка рисков эксплуатации энергетических установок безэкипажных судов**Петров А.П.¹ PetrovAP@gumrf.ru, Костылев И.И.¹ kostylevii@gumrf.ru, Живлюк Г.Е.¹ spb-engine-prof@mail.ru¹Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О.Макарова

Аннотация. Предметом настоящего исследования являются энергетические установки безэкипажных судов. В работе приведены причины интереса к концепции автономного судоходства, в числе которых: снижение тарифов на перевозки; сокращение расходов на топливо на фоне высоких цен на ископаемые углеводороды; минимизация расходов на персонал и др. Отмечается, что в настоящее время большая часть исследований проводится в части, касающихся автономной навигации, связи и кибербезопасности, при этом часто в таких исследованиях пренебрегают проблемами механической установки автономных судов и необходимостью технического обслуживания агрегатов установки. Подчеркивается, что для успешной реализации концепции автономного судоходства эти проблемы должны быть учтены.

Рассматриваются критерии поиска и оценки слабых звеньев в машинных помещениях, которые могут привести к большинству проблем, возникающих у безэкипажных судов, и предлагаются решения для устранения этих недостатков. Исходя из того, что большинство аварий связаны с человеческим фактором, высказывается предположение, что автономное судоходство способно повысить безопасность морских перевозок. При этом уточняется, что беспилотное судоходство потенциально способно привести к другим видам аварий, которые сложно будет предотвратить береговыми центрами управления.

На примере реализации ведущими производителями программ в рассматриваемой области изучены основные особенности исполнения механических установок автономных судов. Рассмотрены основные отказы механических установок, предложена методология оценки возникающих рисков в процессе эксплуатации. Отдельное внимание уделено поиску слабых звеньев в составе судовой энергетической установки. Предлагаются решения для преодоления проблем неожиданных отказов судовых технических средств.

Ключевые слова: безэкипажное судно, автономное управление, механическая установка, человеческий фактор, надежность, отказы, слабые звенья, риски, тяжесть последствий.

Для цитирования: Петров А.П., Костылев И.И., Живлюк Г.Е. Оценка рисков эксплуатации энергетических установок безэкипажных судов, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 110—122. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.013

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.013>**To risk assessment of operation of power plants of unmanned vessels**Alexander P. Petrov¹ PetrovAP@gumrf.ru, Ivan. I. Kostylev¹ kostylevii@gumrf.ru,Grigorij. E. Zhivljuk¹ spb-engine-prof@mail.ru¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

Abstract. The subject of this study is the criteria for finding and evaluating weak links in machine rooms, which can lead to most of the problems that arise in unmanned vehicles, and solutions are proposed to eliminate these weaknesses. The paper presents the reasons for the interest in the concept of autonomous navigation. Including an increase in delivery rates, fuel prices, staff costs, which increased operating costs than it was before. There are suggestions that autonomous navigation could also improve safety. Several studies have reported that from 65 to 96% of all marine accidents are caused by the human factor. However, unmanned navigation is likely to lead to other types of accidents that are difficult to prevent by coastal control centers. If in many areas of transport we are talking about replacing small crews, then for ships this often means replacing a crew of 14-20 people. Currently, most of the research is carried out in terms of autonomous navigation, communications and cybersecurity. At the same time, these studies often neglect the condition of the mechanical installation and the need for maintenance in the machine room. In order for the ship to be fully automated, all these tasks must be taken into account. By the example of the implementation of programs by leading manufacturers in this area, the main features of the problem of the execution of mechanical installations of autonomous vessels are studied. The main failures of mechanical installations are considered, a methodology for assessing the resulting risks of operation, finding weak points is proposed, and solutions for overcoming unexpected equipment failures are proposed.

Keywords: unmanned vessel, autonomous control, power plant, human factor, reliability, failures, weaknesses, risks, severity.

For citation: Alexander P. Petrov, Ivan. I. Kostylev, Grigorij. E. Zhivljuk, To risk assessment of operation of power plants of unmanned vessels, Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 110—122. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.013

Введение

Концепция автономного судоходства существует уже несколько десятилетий, но пик интереса пришелся на последние несколько лет. Причинами тому явились экономический кризис 2008-2009 годов, увеличение тарифов на доставку, цены на топливо, расходы на персонал, что привело к большому росту операционных расходов. Одновременно судоходные компании испытывают все большие трудности с поиском достаточного количества персонала, готового проводить месяцы на борту судна. Прогнозируемая нехватка составляет до 150 000 офицеров для мирового флота к 2025 году [1, 2]. Устранение персонала на борту и перевод его в береговой центр управления по мнению этих авторов повысило бы привлекательность работы в секторе судоходства.

Анализ состояния современного судоходства свидетельствует о том, что от 65 до 96% всех морских аварий вызваны человеческой ошибкой [3, 4]. Множество несчастных случаев происходит из-за усталости или скуки, и то, и другое не является проблемой для машин. Исходя из этого, автономное судоходство способно повысить безопасность мореплавания путем устранения этих факторов. Однако смешивание пилотируемых и безэкипажных судов (БЭС) может создать проблему. Кроме того, беспилотное судоходство, вероятно, приведет к специфическим видам аварий, которые береговыми центрами управления будет сложно предотвратить.

Если во многих областях транспорта речь идет о замене малочисленных экипажей, то для судов это часто означает замену экипажа из 14-20 человек. Применительно к морскому судну, замена экипажа средствами автоматики будет сопряжена с необходимостью решения целого ряда разносторонних проблем, определяемых направленностью деятельности членов экипажа. Несомненно, что в процессе эксплуатации судна, для всего экипажа приоритетной сферой является навигация, но часть членов экипажа отвечают за такие задачи, как техническое обслуживание судовых технических средств (СТС), обработка грузов и швартовка. В тоже время большинство исследований в области БЭС лежат в плоскости решения вопросов автономной навигации, оставляя проблемы создания и функционирования необслуживаемых СТС без должного внимания, рассматривая их как второстепенные [4].

Одними из первых крупномасштабных проектов, которые были осуществлены для изучения возможностей и жизнеспособности автономного судоходства, являются проекты: MUNIN (Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks - Морская беспилотная навигация посредством разведки в сетях) [5], выполненный в рамках 7-й рамочной программы Европейской комиссии; AAWA (Advanced Autonomous Waterborne Applications Initiative - Инициатива по усовершенствованным автономным водным приложениям) фирмы Rolls Royce [6]; концепция судна ReVolt компании DNV GL [7-9]. Значительный объем исследований в данной области проводится и в нашей стране [10-12].

Многие задачи, которые в настоящее время выполняются экипажем судна, весьма сложно решаются безэкипажным образом. Примерами таких задач являются выполнение технического

обслуживания и ремонта вышедших из строя СТС, обработка швартовых тросов и грузов. В основном предполагается, что решением этой проблемы являются различные стратегии технического обслуживания. Оснащение машинных отделений оборудованием, устойчивым к отказам, или установка аккумуляторных батарей потребуют значительных инвестиций. Оборудование, которое никогда (или очень редко) выходит из строя или оборудование с длительными интервалами технического обслуживания обходится дороже, чем существующие СТС. Поэтому многое будет зависеть от спроса со стороны судовладельцев.

Для обеспечения автономности судов важно разрешение проблемы надежности (выявления слабых звеньев) механизмов и систем в машинных помещениях – элементах, локализованных в устройствах механической установки. В предлагаемом исследовании под термином "слабое звено" понимается система или элемент системы - механической установки, которая представляет высокий риск для продолжения безаварийной эксплуатации. Самым простым организационным решением для преодоления неожиданных отказов СТС являются установка полностью резервной механической установки либо установка резервных копий элементов или СТС, которые являются слабыми звеньями в системе.

Принимая во внимание то, что риск - это вероятность, умноженная на последствия, элемент считается высокорисковым либо по причине высокой вероятности его выхода из строя, либо по причине тяжелых последствий отказа. Слабые звенья можно выявить, проверив записи в бортовых журналах или по статистике фирм-производителей об отказах и выяснив, какова наиболее распространенная причина отказа. Однако часто информация об отказах на судах является неполной и недостоверной: записи об отказах не документируют должным образом; практически не документируют частичный отказ, а также сбои, которые были предотвращены или устранены вмешательством экипажа. Для того, чтобы иметь возможность спроектировать механическую установку, которая должным образом оборудована для безэкипажных перевозок, должны быть выявлены и устранены все без исключения слабые звенья. Когда экипаж больше не сможет вмешиваться в работу механизмов, количество слабых звеньев в машинном отделении возрастет, поскольку механизмы, которые раньше, возможно, не представляли проблемы, потому что с ними было легко справиться экипажу, могут стать проблемой, когда на борту нет экипажа.

В настоящем исследовании акцентируется внимание на слабых звеньях в механизмах машинного помещения и рулевого механизма. Оборудование, охватывающее все судно, такое, например, как системы пожаротушения и баллаستировки, приниматься во внимание не будет. Из-за несоответствия между механическими и электрическими элементами в машинных помещениях, а также компетенций авторов, вопросы в области электрических систем будут приняты во внимание только в общих чертах.

Целью настоящей работы является построение методики определения возможных элементов - слабых звеньев - в оборудовании

машинных помещений с оценкой рисков, которые приведут к большинству проблем, возникающих у БЭС.

Методы и материалы

Чтобы иметь возможность правильно оценить слабые звенья в машинных помещениях, важно знать, какие процедуры выполняются персоналом. На основе знаний о занятости, можно определить, какие задачи являются наиболее важными и выполнение которых окажется невозможным, когда машинные помещения станут беспилотными. В нынешней ситуации на большинстве коммерческих судов в составе машинной команды работают по меньшей мере 4 члена экипажа. Их задачи в управлении и организации технической эксплуатации СТС [13] можно разделить на четыре основные категории: управление механической установкой; проверка и наблюдение за оборудованием; техническое обслуживание СТС (выполнение планового технического обслуживания); ремонт СТС (выполнение внепланового технического обслуживания).

Персонал проверяет состояние большинства машин и СТС не реже одного раза в день. Члены машинной команды наблюдают за состоянием СТС и пытаются найти любые дефекты, которые могут быть значимыми. Всякий раз, когда датчики сообщают о неисправности СТС, они проверяют его, чтобы понять, в чем проблема. В основном диагностирование производится органолептическим методом. Большинство наблюдений производится с помощью зрения, но персонал использует все органы чувств для выявления проблем. Например, сотрудник может почувствовать запах дыма или ощутить вкус протечек воды, независимо от того, соленая это вода или пресная. Персонал может ощутить тепло, исходящее от СТС, или ощутить вибрацию. Если оборудование требует технического обслуживания, обычно это входит в обязанности членов экипажа. Для проведения технического обслуживания некоторых СТС привлекаются представители изготовителя оборудования.

Техническое обслуживание выполняется на основе руководств и рекомендаций. Интервал технического обслуживания определяется в зависимости от принятой изготовителями стратегии технического обслуживания. Здесь техническое обслуживание определяется как плановое техническое обслуживание, которое может быть спрогнозировано и запланировано по расписанию.

Незапланированное техническое обслуживание означает, что персонал должен отремонтировать или обслужить оборудование до того, как восстановление работоспособности потребует в соответствии с графиком технического обслуживания. В большинстве случаев это означает, что СТС вышло из строя, и требуется вмешательство человека, чтобы привести его в рабочее состояние. Незапланированное техническое обслуживание может быть критичным, что означает, что его необходимо выполнить в кратчайшие сроки, или некритичным, когда ремонт может быть отсрочен и выполнен по истечении некоторого времени. Критичность обычно определяется последствиями отказа СТС. Хотя большинством СТС можно управлять дистанционно с мостика или центрального

поста управления (ЦПУ), для работы с некоторым оборудованием все еще требуется физическое присутствие персонала в машинном помещении. В некоторых случаях специалисты предпочитают управлять оборудованием напрямую с местных постов, а не дистанционно, поскольку обычно легче обнаружить какие-либо неполадки, когда устройство находится в непосредственной близости. Механизмы и устройства энергетической установки часто оснащены датчиками, которые могут считывать и определять состояние СТС, с последующей передачей информации на ЦПУ или мостик. Датчики будут сигнализировать об отклонениях параметров работы агрегатов, инициируя действия обслуживающего персонала, направленные на локализацию и устранение неисправностей.

Таким образом, предстоит преодолеть еще много препятствий, прежде чем БЭС смогут стать реальностью, и одним из таких препятствий является надежность СТС машинного помещения. На пилотируемых судах персонал в машинном помещении обеспечивает бесперебойную работу в случае отказов, что оказывается недоступным на БЭС.

Основной проблемой в формировании требований к техническому заданию на разработку энергетических установок БЭС является сбор данных о наиболее типичных отказах оборудования машинных помещений. Записи о надежности, такие как OREDA [14], регистрируют только неисправное оборудование, выявленное при техническом обслуживании, но не регистрируют потенциально аварийные ситуации, когда выход из строя оказался бы неизбежен, если бы не вмешательство человеческого фактора. Таким образом, любые имеющиеся данные являются искаженными и непригодными для точного прогнозирования надежности БЭС. Исходя из этого, необходимо формирование баз данных, учитывающих все слабые звенья, которые требуют повышенного внимания экипажа, в том числе и локализованные потенциальные отказы.

Упомянутый ранее проект MUNIN был сосредоточен на дистанционном зондировании, изучая возможности безэкипажных судов «узнавать» об окружающем их пространстве и реагировать соответствующим образом. В проекте затронуты и другие темы, включая связь между судном и берегом, а также ремонт и техническое обслуживание. Что касается технического обслуживания и ремонта, то в качестве решения рассматривается разработка стратегии технического обслуживания, которая подходит для безэкипажных перевозок, и переход на более надежное оборудование. В числе других мер предлагается внедрение автономного двигателя с системой мониторинга и управления, которая сможет автономно управлять машинным помещением и справляться с чрезвычайными ситуациями. Другое предлагаемое изменение в машинном помещении – это переход на дистилляты, так называемые ‘чистые’ виды топлива. Основной причиной этого было устранение необходимости переключения между видами топлива при входе и выходе из зон контроля выбросов (ECA), что представляет собой риск “...слишком высокий для автономной работы”.

В проекте AAWA специалисты Rolls Royce сосредоточились на четырех основных

направлениях. Первое направление состоит в том, чтобы убедиться, что судно обладает ситуационной осведомленностью и может перемещаться автономно. Второй пункт посвящен юридической стороне БЭС. Третий - координационный центр исследует вопросы охраны судна с точки зрения внешних угроз, таких как пиратство. Они также кратко затрагивают тему надежности машин, но лишь заявляют, что она нуждается в улучшении. Последний пункт носит коммерческий характер жизнеспособности. Чтобы сделать автономное судоходство интересным для компаний, необходимо знать, является ли оно коммерчески жизнеспособным. Проблемы в основном заключаются в соблюдении коммерчески выгодного сочетания новых технологий и способности адаптировать нормативные акты таким образом, чтобы обеспечить автономное судоходство. В перспективе видение результата состоит в том, чтобы к концу десятилетия получить первый дистанционно управляемое БЭС.

Проект DNV GL предполагает, что проблему технического обслуживания можно решить, перейдя на полностью электрическое питание. Конструкция не имеет вращающихся частей внутри корпуса судна; электродвигатели установлены внутри асимметричных подруливающих устройств. Сводя к минимуму количество движущихся частей, они сводят к минимуму техническое обслуживание. Несмотря на то, что первоначальные инвестиции во все батареи являются значительными, они утверждают, что возможно сэкономить до 34 млн. дол. США за 30-летний срок.

Большая часть литературы, касающейся машинных помещений, состоит либо из инструментов проектирования, разработанных для оказания помощи в детальном проектировании машинных отделений, либо о физическом и психическом благополучии персонала на борту. Согласно материалам ИМО STCW/CONF.2/34 [15], от персонала требуются определенные навыки, которые включают умение обслуживать оборудование, как электрическое, так и механическое, в соответствии с руководствами. Персонал должен уметь оценивать состояние СТС и выполнять небольшие ремонтные работы на борту при условии наличия надлежащей документации и запасных частей. Решение таких задач будет недоступно на борту БЭС, и либо их необходимо выполнять при заходе судна в порт, либо сделать ненужными путем внесения изменений в конструкцию.

Классификационные общества (в частности, Российский морской регистр судоходства в Части ХУ «Автоматизация») утверждают в своих правилах [16], касающихся периодически безэкипажных машинных отделений, что «Степень автоматизации должна быть достаточной для обеспечения работы машинного помещения без осмотра в течение 24 часа или в течение максимального времени непрерывной работы, если оно составляет менее 24 часов». Это означает, что суда с обозначением знака автоматизации в символе класса судна для периодически необитаемых машинных отделений должны быть способны функционировать в течение 24 часов без присутствия персонала в машинном помещении. DNV требует специальных контрольно-

измерительных приборов и автоматики СТС для этих машинных отделений. Они должны быть способны отключаться при возникновении критического сбоя. Кроме того, они должны быть в состоянии сообщить на мостик и ЦПУ о критическом состоянии оборудования. Для двигателей должна быть предусмотрена возможность управления с мостика, но также может потребоваться их самостоятельный перезапуск после автоматического выключения. При этом нет никаких упоминаний о передаче информации о состоянии машинного помещения кому-либо, не находящемуся на борту судна, хотя эта процедура способна осуществляться современными интегрированными системами управления судном.

Поскольку максимальное время, в течение которого машинное отделение может оставаться без контроля составляет всего 24 часа, могут возникнуть некоторые юридические проблемы с постоянно неуправляемыми машинными помещениями. Это также означает, что нет большого опыта в оставлении машинных отделений без контроля на длительные периоды времени, и неизвестно что может произойти, если машинные помещения оставались без контроля со стороны машинной команды в течение более длительного времени.

И MUNIN, и AAWA предполагают, что более эффективные стратегии технического обслуживания могут помочь в разработке безэкипажных машинных отделений. Однако существует множество различных стратегий технического обслуживания [11-13]. Техническое обслуживание и ремонт можно разделить на три различные категории: корректирующее техническое обслуживание, профилактическое техническое обслуживание и прогнозирующее техническое обслуживание, также называемое техническим обслуживанием на основе условий основанным на состоянии.

Корректирующее техническое обслуживание означает, что элемент ремонтируется после его отказа, и может считаться внеплановым техническим обслуживанием.

Профилактическое обслуживание - это техническое обслуживание, которое выполняется до выхода из строя какого-либо элемента. Большая часть профилактического обслуживания основана на прошлом опыте и не учитывает текущее состояние СТС. Обычно это заключается в проведении технического обслуживания через определенное время или часы работы. Проблема с профилактическим обслуживанием заключается в том, что оно может быть неэффективным с точки зрения затрат: детали, которые все еще находятся в идеальном состоянии, могут быть заменены, в то время как детали, которые, возможно, нуждаются в ремонте, могут оказаться не включенными в программы профилактического обслуживания. Преимуществом профилактического обслуживания является то, что его обычно довольно легко спланировать. Кроме того, обычно оборудование разбирается на части для технического обслуживания с последующей сборкой, что может привести к появлению новых неисправностей в системе, увеличивая вероятность отказов вскоре после технического обслуживания. Это явление называется "ранние отказы", что означает повышенную вероятность выхода из строя в начале

жизненного цикла изделия или, в данном случае, в начале нового срока технического обслуживания.

Техническое обслуживание, основанное на состоянии, можно разделить на три категории. Все эти категории основаны на мониторинге состояния, при котором часто проверяется состояние элементов и устанавливается их исправность.

Первая - это техническое обслуживание, ориентированное на надежность, при котором интервалы технического обслуживания обеспечивают максимальную надежность.

Вторая - проверка на основе рисков, при которой графики технического обслуживания составляются на основе анализа рисков, а не анализа надежности. Это означает, что некоторым элементам разрешается выходить из строя до тех пор, пока последствия отказа невелики.

Последняя категория - это мониторинг состояния (СМ), который определяется Правилами Российского морского регистра судоходства и «представляет собой комплекс технических средств, предназначенных для контроля обстановки в помещениях, на открытых частях палуб, подводного забортного пространства, обеспечения живучести, контроля безопасности и защиты от возможных террористических актов, направленных против судов» для непрерывного или периодического измерения и оценки данных для указания состояния СТС с целью определения необходимости технического обслуживания. Это автоматизированная стратегия технического

обслуживания, которая определяет оборудование, которое нуждается в техническом обслуживании, исходя из текущего состояния элемента, и может использоваться до тех пор, пока доступны данные по элементу. СМ является наиболее прогрессивной из трех категорий, т.к. полагается не только на мониторинг СТС, но и на прогнозы, основанные на данных, полученных в результате мониторинга [17].

Поскольку можно с уверенностью сказать, что ни одно машинное помещение не может быть идеальным, и рано или поздно отдельные узлы выйдут из строя, автономные суда должны будут уметь выявлять и диагностировать серьезные проблемы в своих машинных помещениях. Несмотря на то, что большинство неисправностей могут быть обнаружены датчиками, их наличие может оказаться недостаточным для БЭС. Многие неисправности смогут быть диагностированы людьми, когда судно будет находиться в порту, но было бы предпочтительнее, если бы автономное судно могло самостоятельно диагностировать большинство своих проблем и уведомлять о них персонал на суше для принятия мер, когда судно окажется в порту.

Всестороннее исследование причин выхода из строя СТС, установленного на самолетах и морских судах, проведенное компанией DNV GL, выявило 6 различных моделей частоты отказов, разделенных на две набора: сбои, связанные с жизненным циклом, и случайные сбои, см рис. 1.

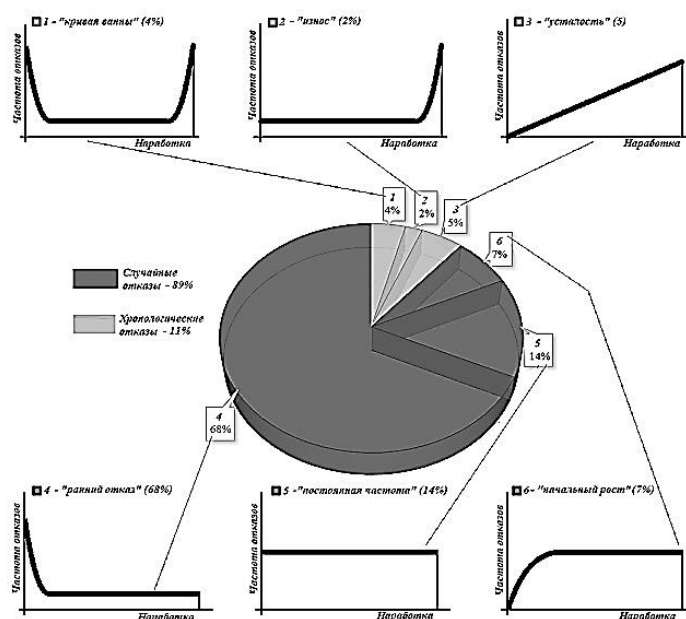


Рис. 1. Закономерности частоты отказов и их распределение [19]

Сбои, связанные с жизненным циклом, - это сбои, которые могут быть напрямую связаны с наработкой и сроком использования изделия (хронологические отказы). Эти отказы делятся на три категории и на них приходится лишь 11% от общего числа отказов.

Первая категория - когда большинство отказов происходит либо в начале срока службы изделия, либо значительно позже, в конце ожидаемого срока службы (поз. 1 на рис.1).

Вторая категория - это случаи, когда изделие изнашивается, и через определенный промежуток времени можно наблюдать резкое увеличение числа отказов (поз. 2 на рис.1).

Третья категория - это усталость, при которой происходит выход изделия из строя, частота отказов медленно увеличивается с течением времени из-за усталости материала (поз. 3 на рис.1).

Ко второму набору категорий относятся случайные отказы, которые, в свою очередь, также

можно разделить на три категории, суммарно составляющие 89% всех наблюдаемых отказов.

Первая и самая многочисленная (68% общего количества отказов) категория этого набора связана с ранними отказами на стадии приработки в начале эксплуатации нового или отремонтированного изделия (поз. 4 на рис. 1).

Ко второй категории относятся все случайные отказы частота которых остается постоянной в течение всего срока службы изделия (поз. 5 на рис. 1).

Последняя категория – отражает сценарий роста отказов в начале срока службы (возможно по причине простоя) оборудования с последующей стабилизацией частоты возникновения неисправностей (поз. 6 на рис.1).

Статистические данные рис. 1 свидетельствуют о том, что только 11% отказов, связанных с жизненным циклом, могут быть спрогнозированы и предотвращены в ходе профилактического обслуживания эксплуатируемого оборудования. Поэтому особенную значимость приобретает обслуживание, которое выполняется в зависимости от состояния СТС и, если его прогностические способности достаточно хороши, позволит предотвратить значительную часть случайных отказов двумя способами: выявляя сбои до того, как они произойдут, и путем снижения ранних отказов после (возможно, ненужного) технического обслуживания.

Большинство компаний ведут учет и накапливают статистику об отказах, произошедших на своих судах, но часто это является конфиденциальной информацией. Таким образом, несмотря на то, что существуют довольно обширные сведения о отказах в море, можно констатировать, что в настоящее время практически отсутствует общедоступная систематизированная информация о влиянии вмешательства человека на надежность машинных помещений и ограничена доступность записей о надежности и техническом обслуживании. Без этой информации при проектировании машинных отделений для БЭС могут быть упущены из виду возможные недостатки или проблемы. Поэтому важно выяснить, что произойдет с надежностью существующих машинных отделений при устранении обслуживающего персонала при переходе к БЭС.

Учитывая то, что, по всей вероятности, машинные помещения для БЭС будут отличаться от помещений пилотируемых судов, для правильного проектирования машинных помещений для БЭС необходимо определить слабые звенья и сконцентрироваться на решении потенциальных проблем.

Разработчики автономных судов руководствуются различными методологиями, основанными на исследовании поведения СТС в пределах жизненного цикла, и рассматривают процессы взаимодействия заинтересованных сторон по созданию и эксплуатации продукции. Сравнение различных методологий показывает, что несмотря на различия названий этапов работ и процессов, содержание и решаемые задачи в них сопоставимы.

Для получения информации о статистике морских аварий и инцидентов к рассмотрению могут быть приняты известные базы данных: Marine

Casualties and Incidents; Marine Accident Investigation Branch (MAIB) reports; Marine Accident Reporting Scheme (MARS) reports; Marine Accident Reports (National Transportation Safety Board NTSB); IHS Markit Casualty and Events. На основе этой информации и рассмотрения различных аспектов создания и использования СТС, необходимо конкретизировать задачи и дать ответы на вопросы: какое оборудование и механизмы в машинных помещениях коммерческих судов станут слабыми звеньями, когда суда станут автономными, и какие изменения в машинных помещениях необходимы и возможны, чтобы судно могло надежно и экономично эксплуатироваться без экипажа.

Для количественной оценки слабых звеньев в машинных помещениях необходимо определить вероятность и последствия выхода из строя машин и СТС. При этом, вся информация об отказах основана на данных, полученных с управляемых судов экипажем которых выполняется техническое обслуживание СТС, и эти отказы непреднамеренно принимаются во внимание. Это означает, что они дают ложное представление о событиях, которые могли бы произойти на любых БЭС. Таким образом, такие данные мало пригодны для поиска характерных слабых звеньев в машинных помещениях автономных судов. Тем не менее, можно предположить, что оборудование, требующее наибольшего технического обслуживания и инспекции в море, станет слабым звеном, когда обслуживание в море будет недоступно. Исходя из этого, одним из способов поиска слабых звеньев оказывается выявление оборудования, которое чаще всего требует технического обслуживания. Поиск такого оборудования может производиться на основе того, что к большинству судового СТС прилагается руководство, в котором указаны интервалы технического обслуживания определенных деталей, обычно указанные в часах наработки и у большинства персонала есть расписание, основанное на этих руководствах, в котором указано, когда и что необходимо сделать. Проблема заключается в том, что при таком подходе учитывается только плановое техническое обслуживание, а внеплановое – может оказаться без должного внимания. По некоторым данным, незапланированным оказывается до 15% всего планового технического обслуживания, которое не регламентируется руководствами или графиками. Это означает, что весомая часть потенциальных отказов может быть упущена из рассмотрения.

Чтобы учесть весь необходимый комплекс работ по техническому обслуживанию СТС необходим обзор всех работ, выполняемых персоналом на борту судов, но такая информация не всегда официально регистрируется должным образом и в полном объеме, особенно при выполнении внепланового обслуживания, а опрос персонала предоставляет субъективные и неоднозначные данные. Для того чтобы получить беспристрастное представление о том, что является слабым звеном, представляется целесообразным анализ служебного времени персонала, затем эта информация может быть использована для поиска слабых звеньев. Можно предположить, что существует корреляция между тем, как часто персонал проверяет оборудование, и надежностью этого СТС.

Международная морская организация (IMO) разработала индекс частоты (FI), определение которого представлено в [18]. Приняв за основу эти данные, можно ввести частотный индекс для количественной оценки применимый для машинных помещений БЭС. Определив с помощью анализа неисправностей системы элементы СТС, подлежащие оценке и принимая во внимание вышесказанное, рассмотрим параметры, определяющие состояние судового СТС. Первым из них является частотный индекс FI, который отображает, как часто персонал взаимодействует с каждым элементом СТС. Вторым индексом - это индекс тяжести последствий SI, в котором будут перечислены последствия сбоя в работе этих элементов. Объединив эти показатели, можно

получить индекс риска RI, который даст общее представление о слабых элементах в машинных помещениях. Чтобы иметь возможность учесть встроенные избыточности, индекс риска используется для создания индекса риска снижения избыточности RRRI. Когда RRRI найден, он проверяется с помощью экспертных заключений. После выявления на основе RRRI слабых звеньев прорабатывается несколько решений, для которых будет проведен анализ затрат. Конечным результатом этого процесса станут рекомендации по перепроектированию машинных помещений с целью адаптации к БЭС. Последовательность операций, направленных на достижение конечного результата показана на рисунке 2.



Рис. 2 Последовательность операций метода

Уровни частот варьируются от 1 до 5, где 1 указывает на низкую частоту, а 5 - на высокую частоту. В таблице 1 приведено значение каждого

показателя частоты для трех уровней обслуживания оборудования. В качестве критерия, в таблице 1 указано количество происшествий за год на судне.

Таблица 1

Индексы частоты, значения указаны в случаях за год эксплуатации судна

Частотный индекс				
FI	Частота	Оборудование для проверки	Выполнение планового технического обслуживания	Выполнение внепланового технического обслуживания
5	Частые	1000	100	10
4	С разумной вероятностью	100	10	1
3	Возможно вероятный	10	1	0,1
2	Отдаленные события	1	0,1	0,01
1	Чрезвычайно отдаленное событие	0,1	0,01	0,001

Чтобы дать представление об этих числах, а также о том, как они будут использоваться для определения частотных индексов элементов, имеет смысл представить частоты событий, в том числе с периодичностью в день, неделю, месяц и т.д. Важно понимать, что элемент, который часто проверяется, сам по себе не всегда имеет тенденцию к выходу из строя, но он может быть хорошим показателем общего состояния других систем. Примерами этого являются резервуары, которые очень редко выходят из строя, но все равно проверяются часто потому что

резервуары, в которых накапливаются загрязнения или которые сливаются быстрее, чем ожидалось, могут указывать на утечку или неисправность где-то еще в системе. Элементы, подобные этому, упоминаются в явном виде, и эти причины также будут приняты во внимание в процессе принятия решения.

Поскольку риск определяется как вероятность отказа, умноженная на индекс тяжести последствия, важно знать, каковы последствия отказа для различных единиц СТС. Последствия отказа может

варьироваться от нулевой до катастрофической, но чаще всего последствия находятся где-то посередине. Поломка определенных частей СТС не обязательно означает, что сам агрегат перестает работать. Часто механизмы все еще могут функционировать, но с ограниченной производительностью, или механизмы могут продолжать функционировать в течение определенного времени. Это особенно актуально в случае резервных установок.

Так же, как и индекс частоты, IMO определила индекс тяжести последствий для использования при оценке риска, который учитывает либо травму, либо гибель людей, либо повреждение судна. Этот индекс тяжести последствий не может быть применен непосредственно в данном контексте, поскольку последствия не могут быть измерены в травмах или гибели людей для БЭС. Тем не менее, он может быть использован в качестве основы для индекса тяжести последствий для данного исследования. Вместо определяющего фактора в виде травм и гибели людей, индекс тяжести последствий для БЭС может базироваться на потере функциональности устройств или основных функций судов. Для этого применительно к автономным судам следует определить три основные функции. Первая функция – «Движение», как способность двигаться вперед и назад. Вторая – «Маневренность», как способность управлять судном и перемещаться в боковом

направлении. Третья – «Связь и контроль», как информационное поддержание статуса судна.

Чтобы иметь возможность определить индекс тяжести последствий на системном уровне, эти функции могут быть сведены к определенным системам в машинном помещении. Тяговая мощность вырабатывается главным двигателем в составе пропульсивного комплекса судна. Маневренность обеспечивается рулевым устройством и носовыми подруливающими устройствами. Хотя связь и управление классически являются функциями, связанными с мостиком судна, для их реализации требуется энергообеспечение. Следовательно, для поддержания работоспособности третья функция будет привязана к функции машинного помещения – выработки и распределения электроэнергии, что обеспечивается генераторными установками и электрической системой.

Уровни тяжести последствий основаны на этих трех функциях и на том, в какой мере автономное судно будет способно выполнять свои функции после отказа какого-либо элемента; учитываются последствия, если оборудование выйдет из строя, даже если будут установлены резервные системы. Индекс тяжести последствий будет определяться тремя составляющими: тяга, маневрирование судна и мощность механической установки. Определение для каждого индекса тяжести последствий можно найти в таблице 2.

Таблица 2

Индекс серьезности последствий сбоя

SI	Тяжесть последствия	Продвижение	Маневрирование	Мощность
1	Незначительные	Незначительная потеря тяги.	Судно все еще может правильно маневрировать.	Незначительная потеря мощности; все системы работают в обычном режиме
2	Легкая степень тяжести	Незначительное снижение двигательных способностей; судно все еще может сохранять позицию в плохую погоду. Полная потеря тяги в течение недели, если неисправность не устранить.	Небольшое снижение маневренности; может дрейфовать в плохую погоду.	Не удастся обеспечить полное питание некоторых систем. Полная потеря мощности в течение недели, если развитие сбоя не остановить.
3	Значительные	Значительное снижение двигательных способностей; скорость значительно падает, и могут возникнуть проблемы в плохую погоду. Полная потеря тяги в течение 24 часа, если неисправность не устранить.	Значительное снижение маневренности, невозможность оставаться на месте в плохую погоду.	Могут отключиться жизненно важные системы, такие как охлаждение груза. Полная потеря питания в течение 24 часов, если развитие сбоя не остановить.
4	Тяжелые	Сильная тяга возможна только при умеренной погоде, когда невозможно продолжить рейс, но все еще можно безопасно добраться до ближайшего порта. Полная потеря тяги в течение нескольких часов, если неисправность не устранить.	Сильно ограничена в маневренности. Не удастся должным образом поддерживать курс	Функционируют только все жизненно важные системы —освещения, навигации и связи. Использование электрических движителей больше невозможно. Полная потеря питания в течение нескольких часов, если сбой не удастся устранить.
5	Аварийные	Катастрофическая полная потеря тяги в течение часа.	Полная потеря маневренности, невозможность задавать курс.	Полная потеря мощности в течение часа, фактически «мертвое» судно

Следующим шагом является создание списка оборудования таким образом, чтобы индекс частоты и индекс тяжести последствий был задан на уровне СТС. Чтобы создать этот список, сначала создается разбивка системы. Эта разбивка состоит из нескольких элементов, а именно: основной двигатель и его вспомогательные элементы, включая редукторные передачи (пропульсивная система); вспомогательный двигатель и генераторные установки; топливная система; масляная система; система охлаждающей воды; система сжатого воздуха; электрическая система и рулевое устройство.

В результате полной разбивки указанных систем СЭУ составляется детальный расширенный список, который может включать 100 и более позиций. С целью сокращения полной разбивки до умеренного числа управляемых и широко применимых величин, используется системная фильтрация на основе ряда критериев, например, исключаются те детали, которые могут быть заменены только в ходе капитального ремонта; также исключаются детали, которые не являются эксклюзивными (ординарные гайки, болты, шайбы); детали автоматических клапанов системы включаются в общую конфигурацию отдельной системы и т.д.

Зная о поломках системы, могут быть определены индексы частоты и индексы тяжести последствий. В первом приближении это должно производиться с учетом мнения представителей обслуживающего персонала. Далее производится корректировка сформированных данных на основе экспертных заключений. Такая корректировка должна производиться в несколько итераций с поэтапной проверкой данных.

Используя подтвержденные показатели частоты и тяжести последствий, можно рассчитать индекс риска. Риск может быть определен в соответствии с уравнением:

$$R = F \cdot S,$$

где R - риск, F - частота, а S - степень тяжести последствий.

Аналогичным образом, мы можем использовать индекс риска. Поскольку индекс риска находится в той же логарифмической шкале, что и индекс частоты, и индекс тяжести последствий, как определено ранее, индекс риска может быть рассчитан в соответствии с:

$$\log(R) = \log(F) + \log(S) \text{ или } RI = FI + SI.$$

Принимая три категории для индекса частоты, а также три категории для индекса тяжести последствий, индекс риска рассчитывается в соответствии с уравнением:

$$RI = \max(FI) + \max(SI),$$

где для определения индекса риска используются индексы максимальной частоты и тяжести последствий. Это гарантирует, что любые проблемные системы будут четко представлены в индексе рисков. Здесь индекс риска имеет ту же форму, что и индекс риска, используемый IMO [18], хотя имеет несколько иные значения.

Индекс риска является хорошим показателем того, какие механизмы и оборудование могут вызвать проблемы, а какие могут стать слабыми звеньями. Индекс риска, используемый в данной работе, может быть проиллюстрирован данными таблицы 3 для среднестатистического крупнотоннажного судна с энергетической установкой мощностью порядка 40 МВт, дополненной в сравнении с [19] тяжестью последствий аварийным или катастрофическим состоянием.

Таблица 3

Индекс риска

FI	Частота	Тяжесть последствий (SI)				
		1	2	3	4	5
		Незначительные	Слабые	Значительные	Тяжелые	Аварийные
5	Частые события	6	7	8	9	10
4	Разумно вероятные события	5	6	7	8	9
3	Несколько вероятные события	4	5	6	7	8
2	Отдаленные события	3	4	5	6	7
1	Чрезвычайно отдаленные события	2	3	4	5	6

Индекс риска колеблется от уровней 2 до 10, причем уровень 2 является наименьшим риском, а 10-й уровень – самый высокий риск. Риски делятся на

три категории матрицы уровней рисков: низкий риск (светло-серые ячейки табл. 3), с индексом риска от 2 до 5; средний риск (серые ячейки табл. 3),

варьирующийся от индекса риска от 6 до 7 и высокий риск (черные ячейки табл.3), когда индекс риска колеблется от 8 до 10.

Индекс риска сам по себе уже является хорошим способом определения слабых звеньев в машинных помещениях, но он упускает из виду важную меру в борьбе с отказами: избыточное оборудование. Большое количество СТС дублируется в составе энергетической установки, часто в виде отдельных систем, чтобы обеспечить непрерывность ее функционирования в случае выхода из строя одного из элементов. Проблема с избыточностью в этом исследовании заключается в том, что она поляризует индекс тяжести последствий, и неизвестно, как это влияет на индекс частоты.

Индекс тяжести последствий, как определено в этой работе, рассматривает влияние нарушения определенного оборудования, включая все установленные резервные устройства. Если, например, генератор выходит из строя, индекс тяжести последствий предполагает, что все генераторы выходят из строя, и питание будет потеряно. Однако если в состав судовой электростанции входит несколько генераторов, и один из них выходит из строя, его функции способен взять на себя другой, находящийся в режиме «stand-by». Это означает, что, если элементы дублированы, индекс тяжести последствий останется равным 1, даже если один из них выйдет из строя. В таком случае неразличимо фактическое оборудование с низкой степенью защиты и резервное оборудование с высокой степенью защиты. Такая поляризованность не помогает в поиске реальных слабых звеньев в системе. При этом также игнорируется тот факт, что резервное оборудование тоже может выйти из строя.

Решением было бы учитывать избыточность при определении степени тяжести последствий, когда степень тяжести последствий избыточного СТС не снижается до 1, но степень тяжести последствий все равно ниже, чем была бы для СТС без резервирования. Примером может служить возможное снижение индекса тяжести последствий для каждой избыточной настройки. Однако следует также учитывать, что избыточность снижает не только последствия отказа, но и вероятность ее возникновения, что в дальнейшем повлияет на показатель частоты.

Показатель частоты, который используется в этой работе, не может определить время до отказа, и поэтому трудно определить вероятность того, что резервное оборудование выйдет из строя одновременно. Вероятность отказа для дублированного СТС может быть определена из уравнения:

$$P(F_{1+2}) = P(F_1 | F_2) = P(F_1)P(F_2) = P(F_1)^2.$$

Таким же образом, вероятность для СТС с двойным резервированием, когда установлено три экземпляра одного и того же оборудования, может быть рассчитано в соответствии с зависимостью: $P(F_{1+2+3}) = P(F_{1+2} | F_3) = P(F_{1+2})P(F_3) = P(F_1)^3$

$P(F_{1+2+3}) = P(F_{1+2} | F_2) = P(F_{1+2})P(F_3) = P(F_1)^3$, где $P(F_1)$ - вероятность отказа для механизма 1 и $P(F_2)$ вероятность отказа для механизма 2; вероятность $P(F_{1+2})$ вероятность того, что отказ обоих механизмов не одновременен. Поскольку оба механизма идентичны, предполагается, что их шансы на отказ также одинаковы. Важно понимать,

что это также влияет на вероятность выхода из строя обоих механизмов по наработке. Когда оборудование выходит из строя, оно будет отремонтировано в следующий возможный момент; недопустимо ждать, пока выйдет из строя и второй механизм. Можно переопределить $P(F)$ как вероятность отказа, которая затем была бы определена в соответствии с выражением:

$$P(F_1) = \frac{TBR}{TBF}.$$

Однако, поскольку фактическая вероятность отказа неизвестна, можно попытаться найти как время между отказами (TBF), так и время между ремонтами (TBR). Если предположить наихудший сценарий, то можно сказать, что оборудование выходит из строя в то время, когда его следовало обслуживать. Это означает, что TBF может быть определен как интервал технического обслуживания. При рассмотрении каботажных морских перевозок время нахождения судна в море составляет не более недели, что может быть использовано в качестве показателя TBR. Как показывает практика эксплуатации, при каждом резервировании вероятность сбоя снижается примерно в 10 раз, что, учитывая логарифмическую шкалу частотного индекса, соответствовало бы снижению на 1 уровень.

Для устранения возникающей неопределенности индекса риска при резервировании СТС может быть введен новый индекс – Индекс избыточности снижения риска (RRRI). Этот индекс определяется как значение индекса риска с вычитанием числа избыточности. Так, для СТС без резервирования R/I равен RRRI. Для СТС с одинарным резервированием RRRI на единицу ниже, чем R/I , в случае двойного резервирования СТС – RRRI ниже на 2. Далее индекс RRRI может использоваться в методике определения слабых звеньев, аналогичной ранее изложенной при составлении таблицы 3. Как только выявляются слабые звенья, надлежит принятие решения по преодолению их слабости. Решения зависят от особенностей слабого звена и могут состоять из нескольких вариантов. Примерами решений могут служить избыточная настройка, поиск альтернатив детали механизма с более низким индексом риска или рассмотрение того, что нужно предпринять, чтобы сделать деталь более надежной. Поиск решения выполняется для каждого элемента с высоким уровнем риска, что означает, что любая деталь с RRRI, равным 8, 9 или 10, будет рассмотрена на предмет улучшения. Также подлежат рассмотрению элементы СТС со средним значением RRRI (т. е. 6 или 7), но в некоторых случаях может последовать вывод, что ряд решений невозможен или финансово нецелесообразны. Элементы с RRRI 5 или ниже рассмотрению не подлежат и связанные с ними риски, считаются приемлемыми.

Выводы (Summary)

В итоге проведенного исследования необходимо акцентировать внимание на наиболее важных аспектах рассматриваемой проблемы.

1. Большинство исследований в области автономного судоходства имеют направленность исследований юридических вопросов и проблем навигации и связи БЭС, в то время, как вопросы надежности оборудования энергетической

установки, агрегаты которой обеспечивают эти функции, остаются без должной проработки. В значительной мере это связано с высокой сложностью и инвариантностью потенциальных исследований и возможных решений.

2. Построение модели рисков и поиска слабых звеньев в оборудовании машинного помещения безэкипажных судов может быть основано на разработанных методиках и данных ИМО для пилотируемых судов с учетом специфики функционирования БЭС.

3. Построение матрицы рисков для поиска слабых звеньев в оборудовании машинного помещения должно производиться на основе определения индексов частоты отказов и индексов тяжести последствий сбоев с обязательным привлечением методов экспертных оценок.

4. Эффективным методом снижения рисков отказов элементов СЭУ оказывается

резервирование оборудования. При этом учет возможного снижения рисков требует индивидуальных подходов, в частности, введения индекса избыточности снижения рисков. Окончательное решение о резервировании оборудования должно приниматься с учетом экономической целесообразности внедрения таких конструкций.

5. Предложенная методика оценок за неимением обширных данных о надежности БЭС может рассматриваться как первичный предварительный поиск потенциальных слабых звеньев в машинных помещениях автономных судов. Дальнейшее совершенствование методики с повышением достоверности результатов анализа может быть достигнуто благодаря привлечению баз данных по отказам БЭС, которая будет развиваться по мере расширения сферы автономного судоходства.

Литература

1. *Porathe T., Prison J., Man Y.* Situation Awareness in Remote Control Centres for Unmanned Ships / T. Porathe, J. Prison, Y. Man // Human Factors in Ship Design & Operation — London, 2014. — DOI:10.3940/rina.hf.2014.12.
2. BIMCO/ICS Manpower Report Predicts Potential Shortage of Almost 150,000 Officers by 2025 BIMCO/ICS Manpower Report // International Chamber of Shipping, 2016. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ics-shipping.org/press-release/bimco-ics-manpower-report-predicts-potential-shortage-of-almost-150000-officers-by-2025-bimco-ics-manpower-report-predicts-potential-shortage-of-almost-150000-officers-by-2025/> (дата обращения: 10.06.2023).
3. *Porathe Ø. J. R., Burmeister H.-C.* Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks / Ø. J. R. Thomas Porathe, Hans-Christoph Burmeister // The MUNIN project in COMPIT – 2013, Pp. 177–182.
4. *Abaei Mohammad Mahdi, Hekkenberg Robert, Toroody Ahmad Bahoo.* A multinomial process tree for reliability assessment of machinery in autonomous ships / Mohammad Mahdi Abaei, Robert Hekkenberg, Ahmad BahooToroody // IEEE Transactions on Reliability — 2021. — Vol. 210. — Pp. 107484. DOI: [org/10.1016/j.ress.2021.107484](https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107484).
5. *Burmeister H.-C., Bruhn W., Rødseth Ø. J., Porathe T.* Autonomous Unmanned Merchant Vessel and its Contribution towards the e-Navigation Implementation / H.-C. Burmeister, W. Bruhn, Ø. J. Rødseth, T. Porathe // The MUNIN Perspective // International Journal of e-Navigation and Maritime Economy — 1 (2014), Pp. 1 – 13.
6. Remote and Autonomous Ship – The next steps. / AAWA Position Paper — 2016, P. 88. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.rolls-royce.com/-/aawa-whitepaper-210616.pdf>. (дата обращения: 15.10.2023).
7. *Pretorius G.* Remotely Controlled Autonomous/Unmanned Ships in Rotterdam Pilot Waters / G. Pretorius // HZ University of Applied Sciences — 2017, p. 141. DOI: 10.13140/RG.2.2.34158.74563.
8. *Tvete H. A.* Unmanned vessels – the dnv gl “revolt” project. / H. A. Tvete // DNV— 2015, P. 29. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://iumi.com/images/Berlin2015/3Pressies/1609_HansAntonTvete.pdf. (дата обращения: 14.06.2023).
9. Craig Benjamin. The Future of Batteries in the Marine Sector: What Lies Beyond the Horizon? / Ben-jamin Craig// University of Southampton — 2020. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.southampton.ac.uk/~assets/doc/The%20Future%20of%20Batteries%20in%20the%20Marine%20Sector.pdf>. p. 66. (дата обращения: 12.06.2023).
10. Казунин Д.В. Разработка проекта требований РС к автономным судам. / Д.В. Казунин, В.В. Ефимов// Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2020. — № 60/61. — С. 4–22.
11. Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС). /НД № 2-030101-037// Российский морской регистр судоходства. — 2020. — С.96.
12. Перспективы беспилотных технологий на водном транспорте: сб. докладов национальной науч.-практ. конф. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — 108 с.
13. РД 31.21.30-97. Правила технической эксплуатации судовых технических средств и конструкций. — / ЗАО ЦНИИМФ. — 2021. — 336 с.
14. *Harahap Vincent August.* Recommendations to improve the quality and the automation of the OREDA data process. / Vincent August Harahap // Norwegian University of Science and Technology. — 2019, — Pp. 85.
15. Det Norske Veritas, Periodically Unattended Machinery Space, Rules Classif. Ships, 2011.
16. Specification of minimum standard of competence for officers in charge of an engineering watch in a manned engine-room or designated duty engineers in a periodically unmanned engine-room in STCW/CONF. // IMO, — 2/34, — 2010, Pp. 86–97.
17. Beyond condition monitoring in the maritime industry // Technical Report — 2014. — DOI:10.13140/RG.2.1.1807.8562.
18. IMO MSC-MEPC 2/CIRC.12/REV.1 Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. IMO (2015).

19. Ефимов В.В. Риск-ориентированный процесс одобрения автономных судов и систем для автономных судов. / Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 62/63. — С.21-42.

References

1. Porathe T., Prison J. and Man Y. «Situation Awareness in Remote Control Centres for Unmanned Ships». Human Factors in Ship Design & Operation London (2014). DOI:10.3940/rina.hf.2014.12.
2. «BIMCO/ICS Manpower Report Predicts Potential Shortage of Almost 150,000 Officers by 2025 BIMCO/ICS Manpower Report». International Chamber of Shipping, (2016). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ics-shipping.org/press-release/bimco-ics-manpower-report-predicts-potential-shortage-of-almost-150000-officers-by-2025-bimco-ics-manpower-report-predicts-potential-shortage-of-almost-150000-officers-by-2025/> (дата обращения: 10.06.2023).
3. Porathe Ø. J. R. and Burmeister H.-C. «Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks». The MUNIN project in COMPIT, (2013): pp. 177–182.
4. Abaei Mohammad Mahdi, Hekkenberg Robert and Toroody Ahmad Bahoo. «A multinomial process tree for reliability assessment of machinery in autonomous ships». IEEE Transactions on Reliability — 2021. — Vol. 210: pp. 107484. DOI: org/10.1016/j.ress. (2021).107484.
5. Burmeister H.-C., Bruhn W., Rødseth Ø.J. and Porathe T. «Autonomous Unmanned Merchant Vessel and its Contribution towards the e-Navigation Implementation». The MUNIN Perspective // International Journal of e-Navigation and Maritime Economy — 1 (2014): pp. 1 – 13.
6. «Remote and Autonomous Ship – The next steps». AAWA Position Paper, (2016), p. 88. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.rolls-royce.com -> aawa-whitepaper-210616.pdf>. (дата обращения: 15.10.2023).
7. Pretorius G. «Remotely Controlled Autonomous/Unmanned Ships in Rotterdam Pilot Waters». HZ University of Applied Sciences, (2017): p. 141. DOI: 10.13140/RG.2.2.34158.74563.
8. Tvette H. A. «Unmanned vessels – the dnv gl “revolt” project». DNV— 2015, p. 29. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://iiumi.com/images/Berlin2015/3Pressies/1609_HansAntonTvette.pdf. (дата обращения: 14.06.2023).
9. Craig Benjamin. «The Future of Batteries in the Marine Sector: What Lies Beyond the Horizon?». University of Southampton — 2020. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.southampton.ac.uk/~assets/doc/The%20Future%20of%20Batteries%20in%20the%20Marine%20Sector.pdf>. p. 66. (дата обращения: 12.06.2023).
10. Kazunin D.V. and Efimov V.V. «Razrabotka proekta trebovanij RS k avtonomnym sudam». [Elaboration of draft RS requirements for autonomous vessels]. Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva.— (2020). — № 60/61: pp. 4–22.
11. «Polozheniya po klassifikacii morskikh avtonomnyh i distancionno upravlyaemyh nadvodnyh sudov» (МАНХ), [Regulations on the classification of marine autonomous and remotely operated surface vessels (МАНХ)]. /ND № 2-030101-037// Rossijskij morskoy registr sudohodstva. — (2020): p.96.
12. «Perspektivy bespilotnyh tekhnologij na vodnom transporte: sb. dokladov nacional'noj nauch.-prakt. Konf». [Prospects of unmanned technologies in water transport] — SPb.: Izd. GUMRF im. adm. S. O. Makarova, (2018): p. 108.
13. RD 31.21.30-97. «Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii sudovyh tekhnicheskikh sredstv i konstrukcij». [Rules of technical operation of ship's technical equipment and structures] ZAO CNIIMF. — (2021): p. 336.
14. Harahap Vincent August. «Recommendations to improve the quality and the automation of the OREDA data process». Norwegian University of Science and Technology. — (2019): p. 85.
15. Det Norske Veritas, Periodically Unattended Machinery Space, Rules Classif. Ships, 2011.
16. «Specification of minimum standard of competence for officers in charge of an engineering watch in a manned engine-room or designated duty engineers in a periodically unmanned engine-room in STCW/CONF». IMO, — 2/34, — (2010): pp. 86–97.
17. «Beyond condition monitoring in the maritime industry». Technical Report — (2014). DOI:10.13140/RG.2.1.1807.8562.
18. «IMO MSC-MEPC 2/CIRC.12/REV.1 Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the imo rule-making process». IMO (2015).
19. Efimov V.V. «Risk-orientirovannyj process odobreniya avtonomnyh sudov i sistem dlya avto-nomnyh sudov». [Risk-based approval process for autonomous vessels and systems for autonomous vessels]. Izd. Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva. — (2021). — № 62/63: 21-42.

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

Петров Александр Павлович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры двигателей внутреннего сгорания и автоматики СЭУ, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: petrovap@gumrf.ru

Alexander P. Petrov, senior lecturer, PhD (Eng), Professor of Department «Internal combustion engines and ship power plants automation», Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya st., Saint-Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: petrovap@gumrf.ru

Костылев Иван Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: kostylevii@gumrf.ru

Ivan I. Kostylev, Dr.Sci. (Eng), professor, Head of Department of «Thermal Engineering», Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya st., 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: kostylevii@gumrf.ru

Живлюк Григорий Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры двигателей внутреннего сгорания и автоматики СЭУ, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: spb-engine-prof@mail.ru

Grigorij E. Zhivljuk, senior lecturer, PhD (Eng), Assistant Professor of Department «Internal combustion engines and ship power plants automation», Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya st., Saint-Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: spb-engine-prof@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.01.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 29.01.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 30.01.2024.

Обзорная статья

УДК 629.5.06

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.014>

Обзор способов регулирования гидравлических сопротивлений

Попов Е.И.¹ e.i.popov@narfu.ru, Некрасов В.А.^{1,2} alexv57@rambler.ru, Фомин А.В.¹ a.fomin@narfu.ru¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, ²ПО «Севмаш»

Аннотация. В данной статье рассматриваются способы уменьшения гидравлических сопротивлений в трубопроводной системе (сети) и их регулирование. Данная тема является актуальной и востребованной не только для судостроительной отрасли, но и для различных отраслей промышленности, где применяется транспортировка рабочей среды по трубопроводной системе (сети). Уменьшение гидравлического сопротивления приводит к увеличению удельной энергии потока жидкости (напора), тем самым позволяя транспортировать различные среды на большие расстояния. В работе рассмотрены основные физические процессы возникновения гидравлического сопротивления, их виды (местные и по длине трубопровода) потери давления (напора) в трубопроводной системе (сети), рассмотрены стандартные методы изменения характеристики насоса, характеристики сети с целью увеличения или уменьшения гидравлических сопротивлений для оптимальной (рекомендуемой) работы насоса на заданную систему (сеть), возникающих в результате отступления от основных правил замеров, изготовления и монтажа трубопроводов, а так же современные методы регулирования гидравлических сопротивлений с последующим анализом актуальности их применения и интегрирования в судовые системы.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, потери давления, потери напора, гидродинамический шум
Для цитирования: Попов Е.И., Некрасов В.А., Фомин А.В. Обзор способов регулирования гидравлических сопротивлений. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 123—128. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.014

Review article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.014>

Overview of methods for regulating hydraulic resistances

Evgeny I. Popov¹ e.i.popov@narfu.ru, Vladimir A. Nekrasov^{1,2} alexv57@rambler.ru,Alexander V. Fomin¹ a.fomin@narfu.ru¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, NArFU branch in Severodvinsk, ²PO "Sevmash"

Abstract. This article discusses ways to reduce hydraulic resistance in a pipeline system (network) and their regulation. This topic is relevant and in demand not only for the shipbuilding industry, but also for various industries where the transportation of the working environment through a pipeline system (network) is used. A decrease in hydraulic resistance leads to an increase in the specific energy of the fluid flow (pressure), thereby making it possible to transport various media over long distances. The work examines the main physical processes of the occurrence of hydraulic resistance, their types (local and along the length of the pipeline), pressure losses (pressure) in the pipeline system (network), and considers standard methods for changing the characteristics of the pump, the characteristics of the network in order to increase or decrease hydraulic resistance for optimal (recommended) pump operation for a given system (network), resulting from deviations from the basic rules of measurement, manufacture and installation of pipelines, as well as modern methods of regulating hydraulic resistance with subsequent analysis of the relevance of their use and integration into ship systems.

Keywords: hydraulic resistance, pressure loss, head loss, hydrodynamic noise

For citation: Evgeny I. Popov., Vladimir A. Nekrasov., Alexander V. Fomin., Overview of methods for regulating hydraulic resistances. Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 123—128. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.014

Введение

Важное место среди оборудования насыщения современного корабля занимают трубопроводные системы (сети), в состав которых входят различные трубопроводы, запорная арматура, механизмы, средства управления, автоматики и вспомогательного оборудования. Задачей трубопроводных систем является транспортировка рабочей среды к потребителям, с помощью которой обеспечиваются различные физические процессы, например, подача забортной воды для охлаждения пресной воды в теплообменном аппарате или подача воздуха среднего давления для управления

запорной арматурой с пневмоприводом. В судовых системах используются в основном такие рабочие среды как: вода (забортная, пресная, высокой чистоты), воздух (высокого, среднего и низкого давления), пар, масло, жидкое топливо и т.д. [1].

В каждой трубопроводной сети во время движения рабочей среды возникают потери энергии. Это обусловлено тем, что среда имеет определённую вязкость, а стенки трубопроводов имеют шероховатость. При движении вязкой среды вдоль шероховатой поверхности возникают силы трения, на преодоление которых необходимо затратить некоторое количество энергии. Энергия,

затрачиваемая на преодоление сопротивлений, показывает потерю напора в сети.

Определение потерь давления на трение по длине потока и местных потерь давления, вызываемых различными запорными и регулирующими устройствами (задвижками, затворами, диафрагмами), а также потерь, возникающих в местах изменения сечения трубы или направления движения жидкости – важная задача, возникающая при гидравлическом расчёте трубопроводов всех видов. Учитывая, что потери давления связаны с профилем скоростей, для решения данной задачи необходимо установить закономерности распределения скоростей потока по сечению. Вопрос о распределении скоростей имеет первостепенное значение также для решения других инженерных задач в области теплопередачи, массообмена, гидро- и пневмотранспорта, измерения расхода жидкостей и газов, так как профиль скоростей определяет интенсивность турбулентного обмена в различных точках потока и связанный с ней перенос тепла, взвешенных твёрдых частиц и т.д. [2].

Каждая сеть характеризуется потерями давления (напора), которые можно разделить на потери на трение по длине трубопровода и потери в местных сопротивлениях:

$$h = h_{\text{тр.}} + h_{\text{м}}, \text{ м.}$$

где: h – потери давления (напора); $h_{\text{тр.}}$ – потери давления (напора) по длине трубопровода; $h_{\text{м}}$ – местные потери давления (напора).

Сеть, представленная на рис. 1, состоящая только из последовательно соединённых участков, различной длины l , разного диаметра d и разным набором местных сопротивлений, называется простой.

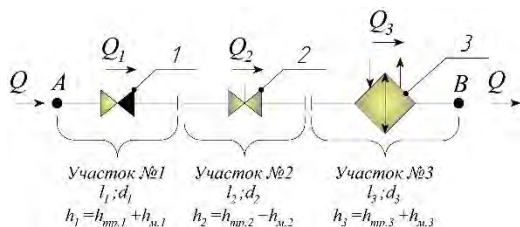


Рис. 1. Пример простой сети:

1 – клапан невозвратный; 2 – задвижка; 3 – теплообменный аппарат; l_i и d_i – длина и диаметр определённого участка, соответственно.

При подаче жидкости от точки А к точке В расход жидкости Q в последовательно соединённых трубах будет одинаков, а полная потеря напора между точками А и В равна сумме потерь напора во всех последовательных трубопроводах:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3, \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$\sum_{i=1}^3 h_i = h_1 + h_2 + h_3, \text{ м.}$$

Сеть, представленная на рисунке 2, в состав которой кроме последовательно соединённых участков входят также и параллельные участки, называются сложной (разветвлённой).

Очевидно, что расход жидкости Q до точки А и после точки В один и тот же и равен сумме расходов в параллельных ветвях. Потери напора для данной сети в каждом из параллельно соединённых трубопроводов будут равны между собой:

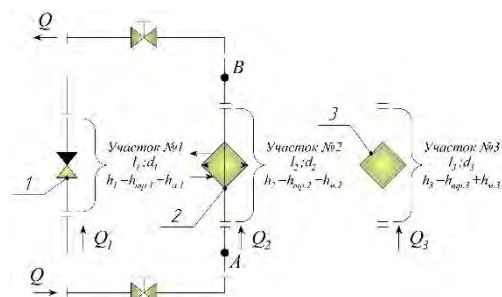


Рис. 2. Пример сложной сети

1 – клапан невозвратный; 2 – теплообменный аппарат; 3 – фильтр; l_i и d_i – длина и диаметр определённого участка, соответственно.

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$\sum_{i=1}^3 h_i = h_1 = h_2 = h_3, \text{ м.}$$

Характеристикой насоса является зависимость его основных технических показателей: напора H , потребляемой мощности N и коэффициента полезного действия (к.п.д.) η от подачи насоса при постоянных частоте вращения его рабочего колеса, вязкости и плотности перекачиваемой среды. Принципиальный график характеристики насоса представлен на рис. 3. Зона характеристики, в пределах которой допускается длительная эксплуатация насоса, называется рабочей частью характеристики. Рабочая часть характеристики, как правило, определяется зоной снижения к.п.д. на 2-3% от максимального его значения.

В общем случае энергия насоса расходуется для подъёма жидкости на высоту $h_{\text{геом.}}$, создавая давление в системе p_6 и преодоление суммарных сопротивлений.

$$H_{\text{см.}} = h_{\text{геом.}} + \frac{p_6}{\gamma} = \text{const} = A, \text{ м.}$$

где: $\gamma = \rho g$ – удельный вес жидкости, Н/м³; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

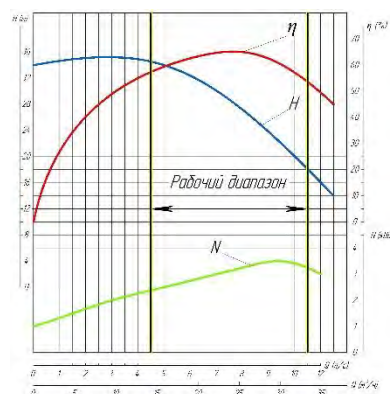


Рис. 3. Принципиальный график рабочей характеристики насоса

Потери в сети приблизительно пропорциональны подаче Q во второй степени [3]:

$$H_{\text{дин.}} \approx BQ^2, \text{ м.}$$

где: B – коэффициент гидродинамического сопротивления сети, зависящий от конфигурации участков сети, состояния их поверхности, плотности и вязкости перемещаемой среды.

Тогда для системы:

$$H_c = H_{\text{см.}} + H_{\text{дин.}} = A + BQ^2, \text{ м.}$$

Характеристикой сети называется зависимость расходуемой энергии от подачи. В общем случае она представляет собой параболу, вершина которой смещена по оси ординат на величину $H_{\text{см.}}$. Крутизна параболы зависит от постоянной B , которая характеризуется суммарным коэффициентом сопротивлений сети [3]:

$$B = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i \cdot l_i}{d_i} \cdot \frac{1}{2 \cdot g \cdot \omega_i^2} + \sum_{i=1}^n \zeta_i \cdot \frac{1}{2 \cdot g \cdot \omega_i^2}$$

где: λ, ζ – коэффициенты сопротивления по длине участка и местного сопротивления; l, d – длина и диаметр участка, м; S – площадь поперечного сечения трубопровода, м^2 ; i – номер участка.

Коэффициент B определяют поэлементным расчётом сети.

Рабочей точкой насоса называется пересечение напорной характеристики насоса и характеристики сети, в которой он установлен.

Характеристика сети и рабочая точка представлены на рис. 4.

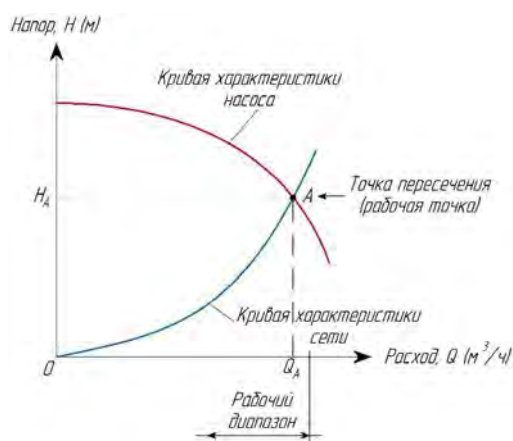


Рис. 4. Напорно-расходная характеристика насоса, характеристика сети и рабочая точка

При проектировании судовых систем проектант с помощью компьютерных технологий может довольно точно выполнить гидравлический расчёт сети, создать её 3D модель, посмотреть и проверить правильность трассировки трубопроводов, арматуры и расположение судового оборудования, используя различные технологии, в том числе и инструментарий виртуальной реальности. Однако, в реальных условиях и на различных этапах постройки судна трубопроводчикам при макетировании труб приходится вносить свои изменения по трассировке трубопроводов: увеличивать или уменьшать длины

трубопроводов, создавать дополнительные погибы, отступать от основных правил и требований изготовления и подключения напорного и всасывающего трубопроводов к насосу, устанавливать дроссельные шайбы, расходомеры и т.д. Такие отступления, как правило, ведут к отклонениям фактических гидравлических сопротивлений трубопроводных систем от расчетных значений, что часто приводит к смещению рабочей точки за границы рабочего диапазона и, как следствие, к снижению к.п.д., увеличению уровней гидродинамического шума и вибрации насосов, перегрузке или недогрузке электропривода, отклонениям рабочих параметров транспортируемой среды от требуемых значений.

Очевидно, что для обеспечения оптимальных условий эксплуатации трубопроводной сети необходимо иметь возможность либо настраивать насос на нагружающую его трубопроводную сеть, либо изменять характеристики сети, добиваясь номинальных значений для данного насоса и заданного режима транспортировки рабочей среды.

Изменение характеристики насоса

1. Изменение числа оборотов n рабочего колеса насоса называется качественным способом регулирования. Этот способ ведёт к изменению напора, создаваемого насосом, но мало влияет на к.п.д. насоса. Напорно-расходная характеристика с изменением числа оборотов рабочего колеса представлена на рис. 5. Однако, этот способ мало эффективен для однорежимных насосов из-за узкого диапазона регулирования в пределах рабочей зоны;

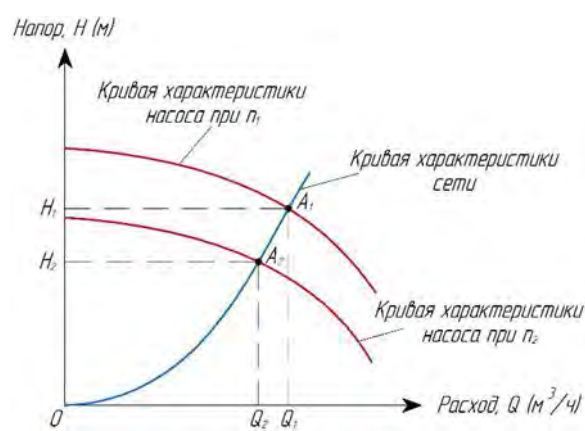


Рис. 5. Напорно-расходная характеристика с изменением числа оборотов рабочего колеса

2. Изменение площади проходного сечения S клапана на нагнетательном трубопроводе называется количественным способом регулирования. Данным способом можно регулировать производительность насоса от нуля до максимума, но при этом создаётся дополнительное гидравлическое сопротивление, что вызывает снижение гидравлического к.п.д. насоса и как следствие снижение его полного к.п.д. Напорно-расходная характеристика с уменьшением площади проходного сечения напорного клапана представлена на рис. 6;

3. Изменение диаметра рабочего колеса насоса (подрезка рабочего колеса). Напорно-расходная характеристика с изменением диаметра

рабочего колеса представлена на рис. 7. Применение этого способа в реальных условиях, особенно в случае частой смены режимов транспортировки рабочей среды, значительно затруднено, так как требует наличия набора рабочих колёс разного диаметра и возможности оперативной остановки и разборки насоса.

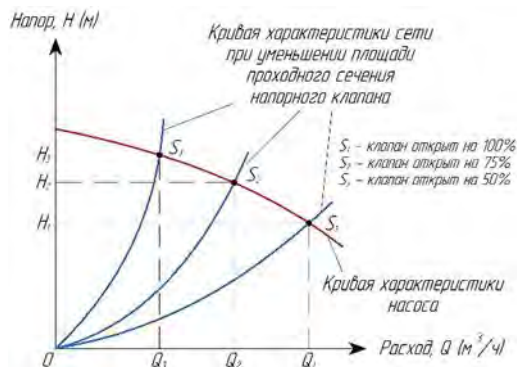


Рис. 6. Напорно-расходная характеристика с уменьшением площади проходного сечения напорного клапана

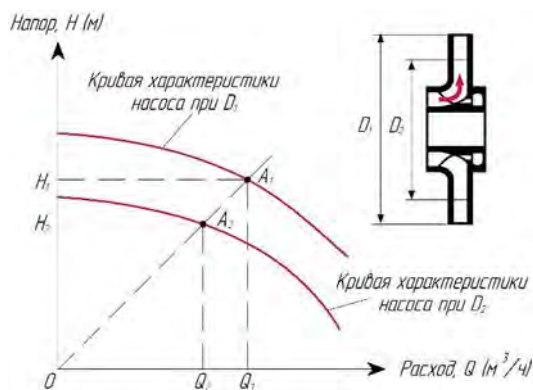


Рис. 7. Напорно-расходная характеристика с изменением диаметра рабочего колеса

Изменение характеристики сети

Традиционными методами изменения характеристики сети являются регулирование (поиск необходимой площади проходного сечения клапана) запорной арматуры на выходе из потребителя и установка дроссельных шайб.

Современными решениями по уменьшению гидравлического сопротивления, возникающего в результате трения рабочей жидкости о стенки труб, являются:

1. Добавление в поток жидкости небольшого количества поверхностно – активных веществ (ПАВ), полимеров и их компонентов (эффект Томпсона). Механизм действия этих присадок различен: одни, адсорбируясь на стенках трубопроводов, создают слой, который уменьшает трение жидкости; другие – уменьшают уровень турбулентности в трубопроводе, не реагируя с его внутренней поверхностью, не меняют свойства перекачиваемого продукта [4]. Основными недостатками данного способа являются: низкая адсорбция на внутренней поверхности трубопровода и разрушение полимеров в зонах интенсивной гидродинамики, а также на участках с большим сдвигающим усилием.

2. Воздействие на пограничный слой жидкости или газа переменным электромагнитным полем [5]. Данный способ сложно осуществить в судовых системах с технологической точки зрения.

3. Уменьшение отрицательной турбулентной вязкости в продольно – однородных турбулентных потоках жидкости или газа вблизи гладких стенок трубопровода. Данный способ заключается в том, что на стенки трубопровода накладывают импульсные колебания, направленные по нормали к поверхности соприкосновения потока со стенками трубопровода [6]. Данный способ, также, как и предыдущий, сложно осуществить в судовых системах с технологической точки зрения.

4. Применение различного рода завихрителей для закручивания рабочей среды. В данном способе используют устройство, похожее на спиралевидную трубу с различными геометрическими размерами, подобранными эмпирическим путём. Отличительной особенностью данных завихрителей является то, что помимо продольной скорости рабочей среде дополнительно придаётся и угловая скорость, которая приводит к вращению потока [7,8]. При этом, следует помнить о том, что завихритель будет являться дополнительным источником гидродинамического шума, вносимым в трубопроводную сеть.

5. Способ трансформации закрученных потоков. При данном способе естественно закрученный поток направляют в устройство трансформации закрученного потока (ТЗП), разделяющего поток на два или более самостоятельных закрученных потоков.

Научное открытие «Явление трансформации закрученного потока жидкости или газа при прохождении через ячеистую пространственную решётку» (научное открытие № 357) было сделано специалистами ИСМАРТА «Севмашвтуза» и «ЦС «Звёздочка» в 2007 г. Авторами открытия рядом исследований доказано, что это явление может быть использовано в устройствах ТЗП, разделяющих моновихревой закрученный поток на несколько закрученных потоков, что позволяет снижать гидравлическое сопротивление трубопроводной сети [9, 10].

Рассмотрим более подробно принцип действия способа трансформации потоков. На рис. 8 представлена принципиальная схема устройства ТЗП.

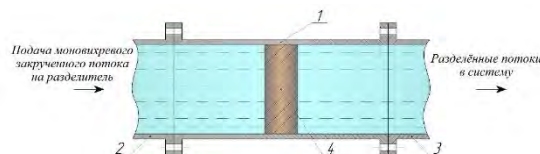


Рис. 8. Принципиальная схема устройства ТЗП: 1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выходной патрубок; 4 – разделитель

Моновихревой естественно закрученный поток через входной патрубок 2 подает на устройство ТЗП, состоящее из корпуса 1 и разделителя 4. В устройстве ТЗП моновихревой поток, разделяется на несколько самостоятельных закрученных потоков, взаимодействующих между собой. Затем

многовихревой поток через выходной патрубок 3 направляется в систему.

Явление трансформации потока было рассмотрено путём 3D моделирования методом конечных объёмов, участка трубопровода, изображённого на рис. 9. В принятой расчётной модели для формирования моновихревого потока на входе трубопровода 1 установлен завихритель 2, после которого закрученный поток поступает на устройство ТЗП 3. Результат расчётов – вихревая картина потока исследуемого участка трубопровода представлена на рис. 10.

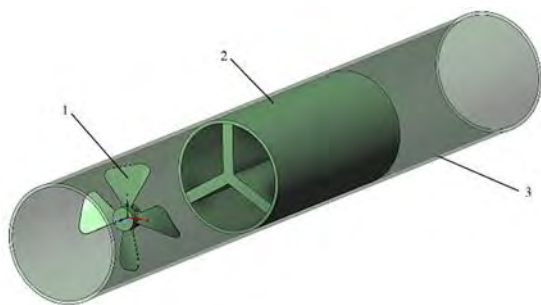


Рис. 9. Геометрия экспериментальной установки:
1 – завихритель, 2 – разделитель, 3 – труба

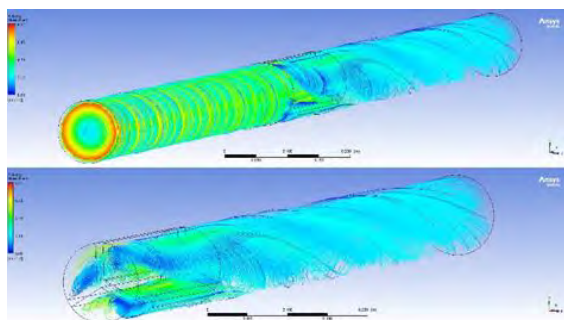


Рис. 10. Вихревая картина потока исследуемого участка трубопровода

Экспериментальные и теоретические исследования данного способа уменьшения гидравлического сопротивления показали:

1. Гидравлическое сопротивление многовихревого потока существенно ниже, чем у моновихревого закрученного потока;
2. Гидродинамический шум многовихревого потока ниже, чем таковой у моновихревого закрученного потока и равен примерно гидродинамическому шуму незакрученного потока;
3. Частота пульсирования сложного многовихревого потока существенно больше, чем у закрученного потока в цилиндрической трубе и пропорциональна числу вихрей.

В реальных условиях при транспортировке жидких и газообразных сред по протяжённым изогнутым трубопроводам поток всегда бывает закрученным, поэтому следует ожидать, что применение устройств ТЗП в виде вставок в трубопроводы (что технически вполне реализуемо) позволит снизить их гидравлическое сопротивление и гидродинамический шум.

Заключение

В результате анализа современных методов уменьшения гидравлического сопротивления, а, следовательно, и гидродинамического шума, для дальнейших экспериментальных и теоретических исследований был выбран наиболее перспективный вариант устройства, принцип действия которого основан на преобразовании моновихревого закрученного потока в мультивихревой поток.

В настоящее время «ПО «Севмаш» и Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова ведут совместные опытно – конструкторские работы, направленные на создание рабочих образцов устройств трансформации закрученных потоков, с целью применения их для снижения гидравлических сопротивлений трубопроводных систем испытательных стендов.

Литература

1. Овчинников И.Н. Судовые системы и трубопроводы (устройство, изготовление и монтаж). Л., «Судостроение», 1971.
2. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления, - 2 – изд. перераб. И доп. М., Недра, 1982, с 224.
3. Михайлов А.К., Малюшенко В.В. Лопастные насосы. Теория, расчёт и конструирование. М., «Машиностроение» 1977.
4. Рыженков В.А. и др. Способ уменьшения гидравлического сопротивления трубопроводных сетей для транспортировки жидких сред. Патент РФ № 2318140. Оpubл.: 27.02.2008.
5. Колосов Б.В. Способ снижения гидродинамического трения. Патент РФ № 2133891. Оpubл.: 27.07.1999.
6. Высоцкий Л.И., Высоцкий И.С. Способ уменьшения отрицательной турбулентной вязкости. Патент РФ № 242445. Оpubл.: 02.07.2011.
7. Повх А.В. Снижение гидравлического трения в трубопроводах.
8. Шаубергер В. Труба для жидких и газообразных субстанций. Австрийский патент № 196680. Оpubл.: 25.03.1958.
9. Горобец А.Г. Вихревые потоки в судовых системах и устройствах. «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», Санкт – Петербург, Российская Федерация.
10. Аин Е.М., Агеев А.В., Горобец А.Г. и др. Способ трансформации потоков. Патент РФ № 2270314. Оpubл.: 20.02.2006

References

1. Ovchinnikov I.N. Sudovye sistemy i truboprovody (ustrojstvo, izgotovlenie i montazh) [Ship systems and pipelines (design, manufacture and installation)]. L., «Sudostroenie», 1971.
2. Al'tshul' A.D. Gidravlicheskie soprotivlenija [Hydraulic resistance], - 2 – izd. pererab. I dop. M., Nedra, 1982, s 224.

3. Mihajlov A.K., Maljushenko V.V. Lopastnye nasosy. Teorija, raschjot i konstruirovanie [Vane pumps. Theory, calculation and design]. M., «Mashinostroenie» 1977.
4. Ryzhenkov V.A. i dr. Sposob umen'shenija gidravlicheskogo soprotivlenija truboprovodnyh setej dlja transportirovki zhidkih sred [A method for reducing the hydraulic resistance of pipeline networks for the transportation of liquid media]. Patent RF № 2318140. Opubl.: 27.02.2008.
5. Kolosov B.V. Sposob snizhenija gidrodinamicheskogo trenija [A method for reducing hydrodynamic friction]. Patent RF № 2133891. Opubl.: 27.07.1999.
6. Vysockij L.I., Vysockij I.S. Sposob umen'shenija otricatejnoj turbulentoj vjazkosti [A method for reducing negative turbulent viscosity]. Patent RF № 242445. Opubl.: 02.07.2011.
7. Povh A.V. Snizhenie gidravlicheskogo trenija v truboprovodah [Reduction of hydraulic friction in pipelines].
8. Shauburger V. Truba dlja zhidkih i gazoobraznyh substancij [Pipe for liquid and gaseous substances]. Avstrijskij patent № 196680. Opubl.: 25.03.1958.
9. Gorobec A.G. Vihrevye potoki v sudovyh sistemah i ustrojstvah [Vortex flows in ship systems and devices]. «GUMRF imeni admirala S.O. Makarova», Sankt – Peterburg, Rossijskaja Federacija.
10. Ain E.M., Ageev A.V., Gorobec A.G. i dr. Sposob transformacii potokov [The method of stream transformation]. Patent RF № 2270314. Opubl.: 20.02.2006.

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 АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Попов Евгений Игоревич, аспирант, ассистент кафедры океанотехники и энергетических установок, Северный (Арктический) Федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Филиал САФУ в г. Северодвинске, 164500, Северодвинск, Архангельская область, улица Капитана Воронина, 6, e-mail: e.i.popov@narfu.ru

Evgeny. I. Popov, graduate student, assistant of department of ocean technology and power plants, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, NArFU branch in Severodvinsk, Kapitana Voronina, 6, Severodvinsk Arkhangelsk region 164500, Russian Federation, e-mail: e.i.popov@narfu.ru

Некрасов Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры океанотехники и энергетических установок, Северный (Арктический) Федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Филиал САФУ в г. Северодвинске, 164500, Северодвинск, Архангельская область, улица Капитана Воронина, 6, начальник сектора, «ПО «Севмаш», 164500, Северодвинск, Архангельская область, улица Архангельское шоссе, 58, e-mail: alexv57@rambler.ru

Vladimir A. Nekrasov, Dr.Sci. (Eng), Professor of department of ocean technology and power plants, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, NArFU branch in Severodvinsk, Kapitana Voronina, 6, Severodvinsk Arkhangelsk region 164500, Russian Federation, The head of the sector, "Po "Sevmash", Severodvinsk, Arkhangelsk region, Arkhangelsk highway street 58, 164500, Russian Federation, e-mail: alex57@rambler.ru

Фомин Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой океанотехники и энергетических установок, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, филиал САФУ в г. Северодвинске, 164500, Северодвинск, Архангельская область, улица Капитана Воронина, 6 e-mail: a.fomin@narfu.ru

Alexandr V. Fomin, Ph.D. (Eng), assistant professor, Head of department of ocean technology and power plants, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, NArFU branch in Severodvinsk, Kapitana Voronina, 6, Severodvinsk Arkhangelsk region 164500, Russian Federation, e-mail: a.fomin@narfu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.12.2023.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 02.02.2024.
Принята к публикации/accepted for publication 06.02.2024.

Научная статья

УДК 621.694

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.015>

Влияние режимных параметров на статические характеристики двигательно-двигательного инжектора

Кожемякин В.В.¹ kogh2022@mail.ru, Морозов Н.А.¹ nikita.morizov99@mail.ru,
 Раевская Ю.И.¹ rayevskayayulia@gmail.com, Левша Д.П.¹ levsha.dima0911@yandex.ru
¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В работе разработаны два варианта двигательно-двигательной установки для скоростного судна. Особенностью таких установок является наличие парогазоводяного струйного аппарата (ПГВСА), используемого в качестве движителя. Также в состав установок входят компрессоры, турбины и насос. Исследования показали, что наиболее существенное влияние на характеристики парогазоводяного струйного аппарата оказывают недогрев смеси на выходе из диффузора после конденсации пара и паросодержание на входе в паровое сопло инжектора. Поэтому в данной работе выполнено расчетно-теоретическое исследование статических характеристик ПГВСА по результатам которого установлено, что при увеличении недогрева газовой смеси после конденсации пара увеличиваются, скорость истечения парогазоводяной смеси на выходе из диффузора и тяга парогазоводяного струйного аппарата, а массовый расход горючего уменьшается. При увеличении паросодержания на входе в парогазовое сопло инжектора уменьшаются тяга и массовый расход горючего.

Ключевые слова: парогазоводяной струйный аппарат, движитель, статические характеристики, установка, недогрев смеси за диффузором, перегрев пара.

Для цитирования: Кожемякин В.В., Морозов Н.А., Раевская Ю.И., Левша Д.П. Влияние режимных параметров на статические характеристики двигательно-двигательного инжектора, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 129—134. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.015

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.015>

Influence of operating parameters on the static characteristics of the propulsion injector

Vyacheslav V. Kozhemyakin¹ kogh2022@mail.ru, Nikita A. Morozov¹ nikita.morizov99@mail.ru,
 Yulia I. Raevskaya¹ rayevskayayulia@gmail.com, Dmitry P. Levsha¹ levsha.dima0911@yandex.ru
¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. In this work, two variants of the propulsion system for a high-speed vessel have been developed. A feature of such installations is the presence of a steam-gas-water jet apparatus (PGVSA), used as a propulsion device. The installations also include compressors, turbines and a pump.

Research has shown that the most significant influence on the characteristics of a steam-gas-water jet apparatus is exerted by the underheating of the mixture at the outlet of the diffuser after steam condensation and the steam content at the inlet to the steam nozzle of the injector. Therefore, in this work, a computational and theoretical study of the static characteristics of the steam-gas-water jet apparatus was carried out, based on the results of which it was established that with increasing underheating of the gas-water mixture after steam condensation, the flow rate of the steam-gas-water mixture at the outlet of the diffuser and the thrust of the steam-gas-water jet apparatus increase, and the mass flow of fuel decreases. As the vapor content at the inlet to the steam-gas nozzle of the injector increases, the thrust and mass flow of fuel decrease.

Key words: steam and gas jet machine, propulsor, static characteristics, installation, non-heating of the mixture behind the diffuser, steam overheating.

For citation: Vyacheslav V. Kozhemyakin, Nikita A. Morozov, Yulia I. Raevskaya, Dmitry P. Levsha, Influence of operating parameters on the static characteristics of the propulsion injector, Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 129—134. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.015

Введение

Нынешние силовые установки, в которых в качестве главных двигателей используются высокооборотные дизели, а в качестве движителей – гребные винты, на отечественных судах на подводных крыльях типа «Метеор» позволяют развивать скорость хода до 65 км/ч. Как следует из работы [1] на более высокой скорости следует использовать водометные движители – то есть вместо гребных винтов использовать реактивную

струи. При этом насосную часть водометного движителя приводит газовая турбина.

Реактивную струю можно создать, например, в парогазоводяном струйном аппарате (ПГВСА), в котором вместо пара поступает парогазовая смесь, образующаяся при сжигании аммиака или метана.

В традиционном ПВСА со сверхзвуковым паровым соплом пар конденсируется в цилиндрическом участке камеры смешения и в диффузор поступает однофазная вода с низкой скоростью [2]. В диффузор созданного для первого

контура ПВСА с дозвуковым паровым соплом [3-4, 9-11] поступает движущийся с критической скоростью двухфазный поток, и в диффузоре происходит дальнейший разгон двухфазного потока. А в диффузоре ПВСА также осуществляется сверхкритический разгон парогазоводяной смеси. Если диффузор короткий и в нём скачка конденсации не происходит, то на выходе из него будет двигаться со сверхкритической скоростью парогазоводяная смесь.

Использование такого ПВСА в качестве гидрореактивного двигателя описано в патенте [10]. Достоинством такого гидрореактивного двигателя является то, что он обеспечивает более высокую удельную тягу (отношение тяги к массе двигательной установки).

Однако встаёт вопрос о выборе длины диффузора и его связи с режимными параметрами.

1 Постановка задачи исследования

На рисунке 1 представлено изменение давления вдоль проточной части ПВСА.

Следует подчеркнуть, что если в диффузоре не будет скачка конденсации, то ПВСА не будет создавать напор, а будет гидравлическим сопротивлением.

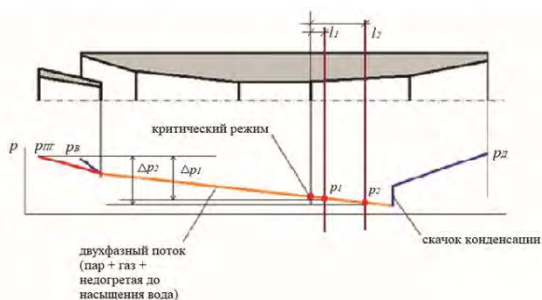


Рис. 1. Изменение давления вдоль проточной части ПВСА

При длине диффузора l_1 и давлении за диффузором p_1 гидравлическое сопротивление составляет Δp_1 ; при длине диффузора l_2 и давлении за диффузором p_2 гидравлическое сопротивление составит Δp_2 . Однако давление за диффузором (p_1 или p_2) должно равняться давлению окружающей среды. Следовательно, пар и вода, поступающие в парогазоводяной струйный аппарат, должны иметь давления значительно выше.

Причём чем длиннее диффузор, тем больше скорость на выходе из диффузора и гидравлическое сопротивление ПВСА.

Поэтому двигательная установка должна содержать компрессоры, подающие горючее и окислитель, насос для подачи воды, а также турбину, приводящую их.

Таким образом, установка с инжекторным двигателем должна иметь схему, представленную на рисунке 2.

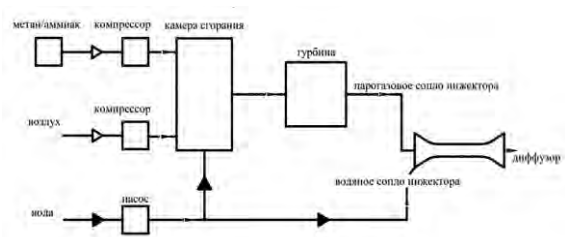


Рис. 2. Схема установки с инжекторным двигателем

На самом деле, при использовании такой установки на судах, развивающих скорость около 100 км/ч, создаётся динамический напор набегающего потока, достаточный для того, чтобы подавать воду в водное сопло ПВСА, и наличие насоса становится не нужным.

Компрессоры для горючего также можно исключить из схемы, поскольку метан или аммиак целесообразно хранить на судне в смешанном виде, и для подачи в камеру сгорания будет требоваться только его подогрев. Схема установки с учётом таких условий представлена на рисунке 3.

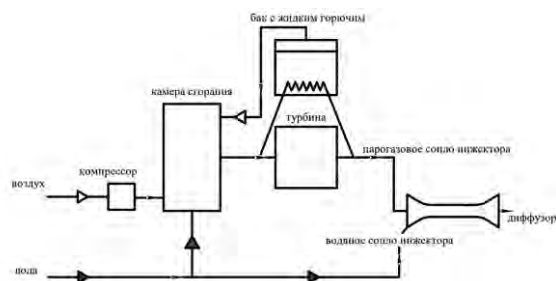


Рис. 3. Схема установки с инжекторным двигателем для судов, развивающих скорость около 100 км/ч

Конструктивно эта схема гидрореактивного двигателя может быть реализована, как представлено на рисунке 4.



Рис. 4. Расположение инжектора на судне

Для обоснованного выбора параметров при проектировании установки необходимо знать влияние этих параметров на характеристики такой установки. Предыдущие исследования ПВСА показали, что наиболее существенное влияние на характеристики оказывают недогрев смеси на выходе из диффузора после конденсации пара и паросодержание на входе в паровое сопло инжектора. Поэтому в данной работе исследовано влияние на статические характеристики установки именно этих параметров.

2. Проведение исследования

Расчёт был проведён для судна со скоростью 80 км/ч. При исследовании в расчёте не учитывались турбина, насос и компрессоры. В качестве горючего рассмотрено использование метана или аммиака. В качестве исходных данных были приняты следующие параметры.

Для метана:

- давление в камере сгорания 0,45 МПа;
- диаметр цилиндрического участка камеры смещения 0,140 м;
- диаметр выходного сечения диффузора 0,141 м²;
- давление на входе в диффузор 0,1363 МПа.

Для аммиака:

- давление в камере сгорания 0,7 МПа;
- диаметр цилиндрического участка камеры смещения 0,228 м;
- диаметр выходного сечения диффузора 0,229 м²;
- давление на входе в диффузор 0,1300 МПа.

Давление на выходе из диффузора в обоих случаях 0,1200 МПа.

При изменении данных параметров диаметры цилиндрического участка проточной части и выходного сечения диффузора оставались неизменными.

Двигательно-движительная установка рассчитывалась так, чтоб создать тягу на принятом режиме, которая обеспечила бы скорость движения судна, равную 80 км/ч.

Под Δt_{CM} на графиках подразумевается недогрев газовой смеси после конденсации пара на выходе из диффузора. Однако следует подчеркнуть – из диффузора выходит сверхкритический поток парогазовой смеси, а конденсация пара происходит за диффузором. Паросодержание на входе в паровое сопло инжектора принято равным 1.

При увеличении Δt_{CM} растёт скорость истечения парогазовой смеси из диффузора (рисунок 5), причем скорость парогазовой смеси для аммиака выше, чем для метана.

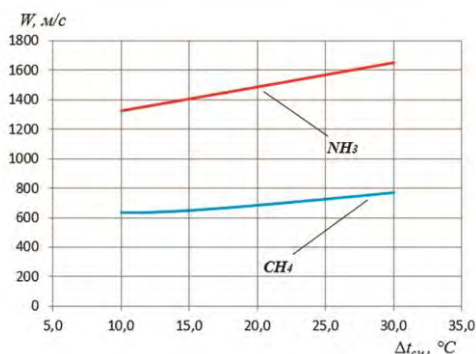


Рис. 5. Зависимость скорости парогазовой смеси на выходе из диффузора от Δt_{CM}

Для ПГВСА можно рассматривать два коэффициента инжекции: паровой коэффициент инжекции U_p (отношение массового расхода воды к массовому расходу пара) и общий коэффициент

инжекции U_s (отношение массового расхода воды к массовому расходу парогазовой смеси).

При увеличении Δt_{CM} увеличиваются оба коэффициента инжекции (рисунок 6). Причем U_p выше для аммиака, а U_s выше для метана. Это связано с тем, что доля водяного пара в продуктах сгорания аммиака больше чем в продуктах сгорания метана.

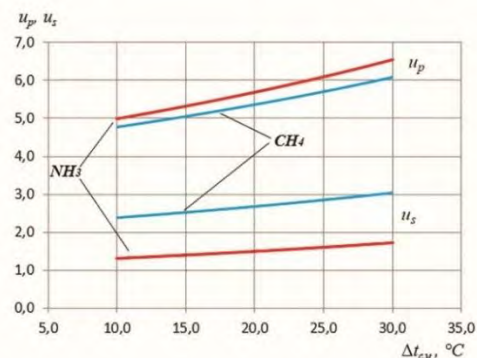


Рис. 6. Зависимость коэффициентов инжекции от Δt_{CM}

Увеличение скорости и общего коэффициента инжекции приводит к увеличению тяги (рисунок 7).

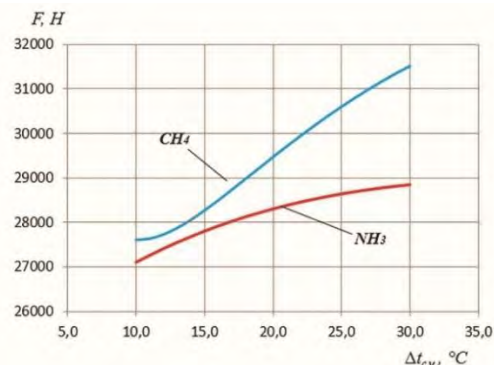


Рис. 7. Зависимость тяги установки от Δt_{CM}

Массовый расход горючего при увеличении Δt_{CM} снижается (рисунок 8). Причем массовый расход аммиака выше, чем метана.

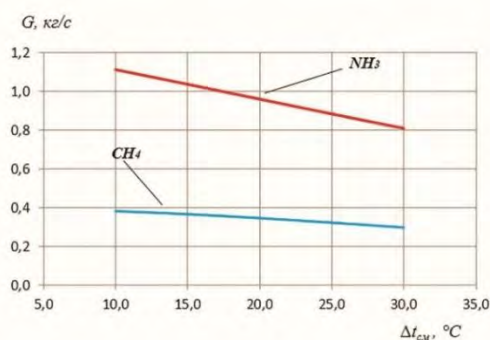


Рис. 8. Зависимость тяги установки от Δt_{CM}

В конфузоре ПВСА движется смесь пара и недогретой до насыщения воды. Конденсация пара в конфузоре не происходит, но только при небольшом недогреве. При увеличении Δt_{CM} снижается температура воды в конфузоре, и может произойти полная конденсация пара в конфузоре. Это, так называемый, срыв по холодной воде – ПВСА перестает работать как насос. Срыв ПВСА по холодной воде хорошо изучен, в том числе, экспериментально. Однако для ПГВСА таких данных нет, и давать на основании рисунков 5-8 рекомендации по выбору значения Δt_{CM} преждевременно.

Влияние паросодержания при парциальном давлении пара в парогазовой смеси представлено на рисунках 9-12. Наличие излома на графиках при паросодержании равном единице связано с тем, что параметры влажного и перегретого пара существенно различаются. Недогрев смеси на выходе из диффузора после конденсации пара принят равным 20 °С.

Скорость истечения парогазоводяной смеси из диффузора увеличивается при увеличении перегрева пара и практически не меняется в области влажного пара (рисунок 9).

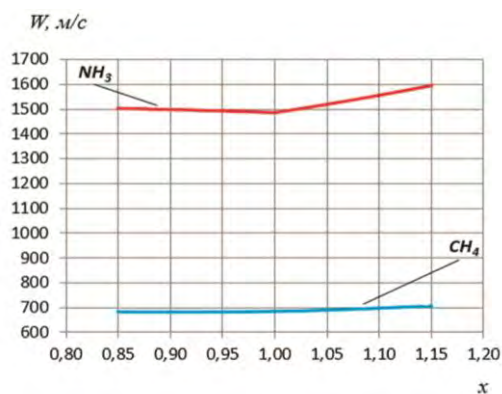


Рис. 9. Зависимость скорости парогазоводяной смеси на выходе из диффузора от паросодержания

При увеличении паросодержания паровой коэффициент инжекции u_p и общий коэффициент инжекции u_s увеличиваются (рисунок 10).

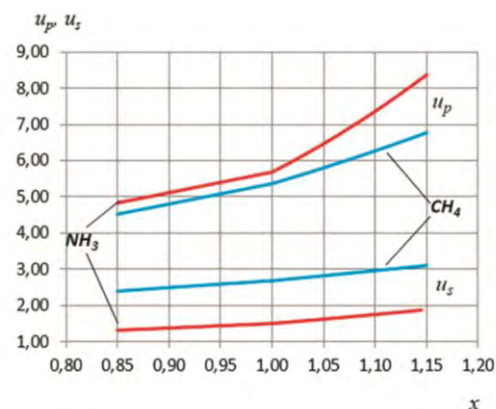


Рис. 10. Зависимость коэффициентов инжекции от паросодержания

Хотя с увеличением паросодержания коэффициенты инжекции увеличиваются, расход заборной воды снижается, поэтому снижается и тяга (рисунок 11).

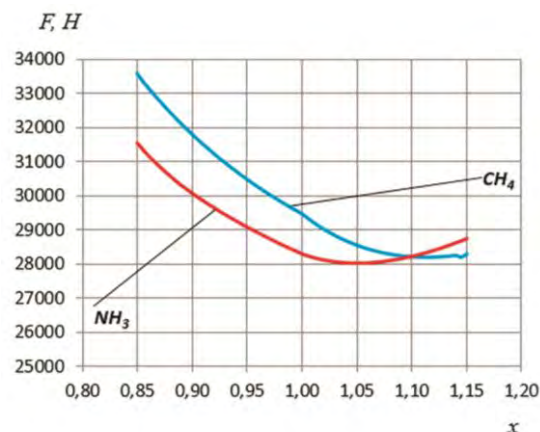


Рис. 11. Зависимость тяги от паросодержания

Массовый расход горючего при увеличении паросодержания также снижается (рисунок 12).

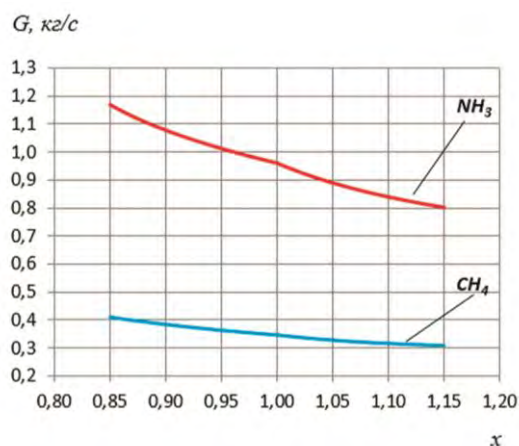


Рис. 12. Зависимость массового расхода горючего от паросодержания

Следует отметить, что такая установка имеет низкий КПД – около 5 %. Поэтому использовать инжектор в качестве двигателя следует в тех случаях, когда нужна высокая скорость, а экономичность не является определяющей.

Заключение

В ходе работы выполнено расчетно-теоретическое исследование двигательно-двигательной установки с инжекторным двигателем и предложены схемы установки.

По результатам выполненного расчетно-теоретического исследования установлено, что при увеличении недогрева газовой смеси после конденсации пара увеличиваются скорость истечения парогазоводяной смеси на выходе из диффузора и тяга инжектора, а массовый расход горючего уменьшается.

При увеличении паросодержания на входе в парогазовое сопло инжектора уменьшаются тяга и массовый расход горючего.

Литература

1. Зайцев Н.А., Маскалик А.И. Отечественные суда на подводных крыльях // Ленинград: Изд-во Судостроение, 1967.
2. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты // Москва: Энергоатомиздат, 1989.
3. Аполлова А.В., Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Шаманов Н.П. Экспериментальные исследования системы пассивного отвода тепла на Приморской учебно-научной базе СПбГМТУ // Морские интеллектуальные технологии. 2018, № 4 (42) т. 1, с. 115 – 123.
4. Аполлова А.В., Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Тихомиров Б.А., Русаков Е.С. Экспериментальное исследование систем пассивного отвода тепла с ПВСА для реакторных установок // Морские интеллектуальные технологии. 2019, № 4 (46) т. 1, с. 123 – 129.
5. 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.
6. Аполлова А.В., Кожемякин В.В., Кожемякин В.О., Тихомиров Б.А. Безбойлерная система теплоснабжения с пароводяными струйными средствами циркуляции // Морские интеллектуальные технологии. 2019, № 1 (43) т. 3, с. 103 – 108.
7. Аполлова А.В., Гайсина А.О., Кожемякин В.В. Квазистатические характеристики системы пассивного отвода тепла // Морские интеллектуальные технологии. 2019, № 1 (43) т. 3, с. 115 – 121.
8. Гайсина А.О., Кожемякин В.В., Кожемякин В.О. Расчетно-теоретическое исследование зависимости давления от нагрузки при работе пароводяного струйного аппарата на статических характеристиках // Морские интеллектуальные технологии. 2019, № 4 (46) т. 1, с. 136 – 141.
9. Гоняева С.С., Калмыков А.Н., Кожемякин В.В., Кошкин Н.Д., Маловик Д.С., Морозов Н.А. Использование пароводяного струйного аппарата в качестве движителя на скоростных судах // Морские интеллектуальные технологии, 2022. №2 часть 2. с. 106 – 110.
10. Кожемякин В.В., Морозов Н.А., Гоняева С.С., Шаманов Д.Н., Раевская Ю.И. Гидрореактивный движитель. Патент на полезную модель № 217740. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам Российской Федерации, 2023.

References

1. Zajcev N.A., Maskalik A.I. Otechestvennyye suda na podvodnyh kryl'yah [Domestic hydrofoils]. Leningrad: Izd-vo Sudostroenie, 1967.
2. Sokolov E.Ya., Zinger N.M. Struynye apparaty [Inkjet apparatus]. Moskva: Energoatomizdat, 1989.
3. Apolova 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.
4. Apolova 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.
5. Ignat'eva E.S., Kozhemyakin V.V. Raschetno-teoreticheskoe issledovanie raboty parovodyanogo struynogo apparata pri dopolnitel'nom podvode vody v kameru smesheniya [Computational and theoretical research work stem-water jet apparatus with additional water inlet to the mixing chamber]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019, № 4 (46) t.1, s. 148 – 152.
6. Apolova A.V., Kozhemyakin V.V., Kozhemyakin V.O., Tikhomirov B.A. Bezboylernaya sistema teplosnabzheniya s parovodyanymi struynymi sredstvami tsirkulyatsii [Non-Boiler heat supply system with steam-water jet means of circulation]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019, № 1 (43) t. 3, s. 103 – 108.
7. Apolova A.V., Gaysina A.O., Kozhemyakin V.V. Kvazistaticheskie kharakteristiki 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.
8. Gaysina A.O., Kozhemyakin V.V., Kozhemyakin V.O. Raschetno-teoreticheskoe issledovanie zavisimosti davleniya ot nagruzki pri rabote parovodyanogo struynogo apparata na staticheskikh kharakteristikakh [Calculation and theoretical study of the dependence of pressure on load when operating a steam-water jet apparatus on static characteristics]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019, № 4 (46) t. 1, s. 136 – 141.
9. Gonjaeva S.S., Kalmykov A.N., Kozhemyakin V.V., Koshkin N.D., Malovik D.S., Morozov N.A. Ispol'zovanie parovodjanogo struynogo apparata v kachestve dvizhitelja na skorostnykh sudah [Use of a steam-water jet apparatus as a propulsion device on high-speed vessels]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2022, №2 chast'2, s. 106 – 110.
10. Kozhemyakin V.V., Morozov N.A., Gonyaeva S.S., Shamanov D.N., Raevskaya Yu.I. Gidroreaktivnyy dvizhitel' [Hydrojet propulsion]. Patent na poleznuyu model' № 217740. Federal'naya sluzhba po intellektual'noy sobstvennosti, patentam i tovarnym znakam Rossiyskoy Federatsii, 2023.

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

Кожемякин Вячеслав Вячеславович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой судовой ядерной и водородной энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kogh2022@mail.ru

Морозов Никита Александрович, ассистент кафедры судовой ядерной и водородной энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: nikita.morizov99@mail.ru

Раевская Юлия Ильинична, студент группы 2163, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: rayevskayayulia@gmail.com

Левша Дмитрий Петрович, студент группы 2163, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: levsha.dima0911@yandex.ru

Vyacheslav V. Kozhemyakin, Dr. Sci. (Eng), Associate Professor, the head of department of ship nuclear and hydrogen energetics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kogh2022@mail.ru

Nikita A. Morozov, assistant of department of ship nuclear and hydrogen energetics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: nikita.morizov99@mail.ru

Yulia I. Raevskaya, student, group 2163, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: rayevskayayulia@gmail.com

Dmitry P. Levsha, student, group 2163, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: levsha.dima0911@yandex.r

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 26.12.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.01.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 28.01.2024.

Научная статья

УДК 621.431.74.016

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.016>

Оценка влияния энергетических параметров излучения пламени на локальный радиационный теплообмен в камере сгорания судовых дизелей

Руднев Б.И.¹ povalichina@mail.ru, Повалихина О.В.¹ povalichina@mail.ru¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. В статье приведены экспериментальные и расчетные данные по энергетическим параметрам излучения пламени: температуре, степени черноты и концентрации частиц сажи в камере сгорания высокооборотных и среднеоборотных судовых дизелей. Они дают возможность еще на стадии проектирования новых моделей судовых дизелей более адекватно задавать граничные условия со стороны рабочего тела при оценке теплового и напряженно-деформированного состояния деталей, образующих камеру сгорания. Отмечено, что расчетные данные по указанным выше параметрам, полученные при использовании различных математических моделей, существенно отличаются друг от друга. Показано, что влияние эффективных потоков излучения на величину результирующих радиационных тепловых нагрузок деталей камеры сгорания даже для судовых дизелей со сверхвысокими параметрами рабочего процесса незначительно и им можно пренебречь. Целью настоящей статьи является представление, обсуждение и анализ влияния экспериментальных и расчетных данных по энергетическим параметрам излучения пламени на процесс локального радиационного теплообмена в камере сгорания судовых дизелей. Приведенные в статье экспериментальные и расчетные данные по энергетическим параметрам излучения пламени могут быть использованы для верификации как уже существующих, так и новых математических моделей процесса локального радиационного теплообмена и для оценки теплового и напряженно-деформированного состояния деталей камеры сгорания судовых дизелей на стадии проектирования.

Ключевые слова: судовой дизель, камера сгорания, локальный радиационный теплообмен, излучение пламени, результирующий поток излучения.

Для цитирования: Руднев Б.И., Повалихина О.В. Оценка влияния энергетических параметров излучения пламени на локальный радиационный теплообмен в камере сгорания судовых дизелей, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 135—141. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.016

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.016>

Evaluation of power influence parameters of radiation flame on local radiative heat transfer in marine diesels combustion chamber

Boris I. Rudnev¹ povalichina@mail.ru, Olga V. Povalikhina¹ povalichina@mail.ru¹Far Eastern State Technical Fisheries University, Russian Federation

Abstract. Experimental and calculation data from power parameters of radiation flame: temperature, degree of blackness and concentration particles of soot in high speed and medium speed of marine diesels combustion chamber are given in article. They give possibility else on period of new models design of marine diesels more adequate determine boundary conditions about working gas by evaluation thermal and power deformed condition of details combustion chamber. Calculation data from this parameters received by using of different mathematical models respectably differentiate type from type are informed. Influence effective fluxes of radiation on value result radiative thermal loads of combustion chamber details even for marine diesels with extra high parameters of working process inconsiderable and may be disdained are shown. Purpose of this article is presentation, discussion and analysis of influence of experimental and calculation data from power parameters of flame radiation on process local radiative heat transfer in marine diesel combustion chamber. Experimental and calculation data from power parameters radiation of flame may be used for verification this and new mathematical models of process of local radiative heat transfer and for evaluation thermal and power deformed condition of marine diesels combustion chamber details on period of design are given in the article.

Key words: marine diesel, combustion chamber, local radiative heat transfer, radiation of flame, result flux of radiation.

For citation: Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Evaluation of power influence parameters of radiation flame on local radiative heat transfer in marine diesels combustion chamber, Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 135—141. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.016

Введение

Оценка на стадии проектирования локальных тепловых нагрузок деталей, образующих камеру сгорания (КС) судовых дизелей, все еще вызывает значительные трудности. Особенно это касается тепловых потоков, обусловленных излучением

пламени. Даже при использовании современных пакетов прикладных программ, реализующих математические модели с различными вариантами процесса сгорания топлива, часть полученных расчетных результатов весьма сложно интерпретировать. Это объясняется отсутствием достоверных экспериментальных данных по

локальным радиационным тепловым потокам для большого класса двигателей, в том числе и для судовых высоко – и среднеоборотных дизелей, являющихся предметом исследования в данной работе. Целью настоящей статьи является представление и анализ влияния экспериментальных и расчетных данных по энергетическим параметрам излучения пламени на процесс локального радиационного теплообмена в КС судовых дизелей.

Температура, степень черноты пламени и концентрация частиц сажи в камере сгорания судовых высокооборотных дизелей

В теории радиационного теплообмена к энергетическим параметрам излучения пламени относят его температуру и степень черноты [1 – 3]. Концентрация частиц сажи оказывает основное влияние на спектральную оптическую толщину пламени [1] в соответствии с зависимостью (1).

$$\tau_{\lambda} = 1.5K_{\lambda} \mu L / (jd), \quad (1)$$

где K_{λ} – спектральный коэффициент ослабления; μ – концентрация частиц сажи; L – эффективная длина пути луча; j, d – удельный вес и средний диаметр частиц сажи соответственно.

Необходимо отметить, что температура пламени и концентрация частиц сажи в КС являются локальными величинами. На рис. 1 показано изменение локальной температуры пламени в КС полученное авторами, при испытании судового высокооборотного дизеля 8ЧН 13/14.

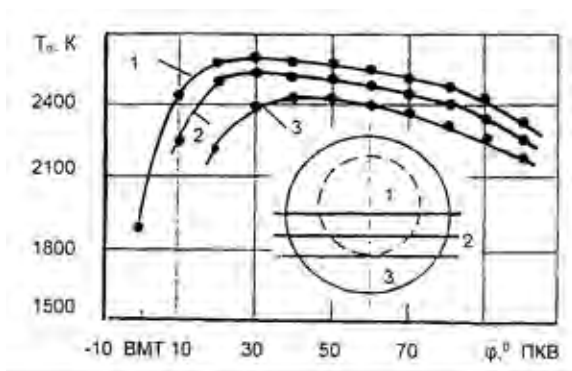


Рис. 1. Изменение локальной температуры пламени в КС дизеля 8 ЧН 13/14, $P_{me}=0.61$ МПа; $n=1700$ мин⁻¹; 1, 2, 3 – номера хорд, по направлению которых проводились измерения температуры пламени; ---- след КС в поршне

При этом хорда 1 проходит через центр КС, хорды 2 и 3 отстоят от центра КС на 47 и 56 мм соответственно. Экспериментальные данные, представленные на рис. 1, показывают, что температура пламени уменьшается от центра к периферии КС, диапазон ее изменения составляет 200 – 250 К. Экспериментальные данные по концентрации частиц сажи в КС указанного выше дизеля показаны на рис. 2.

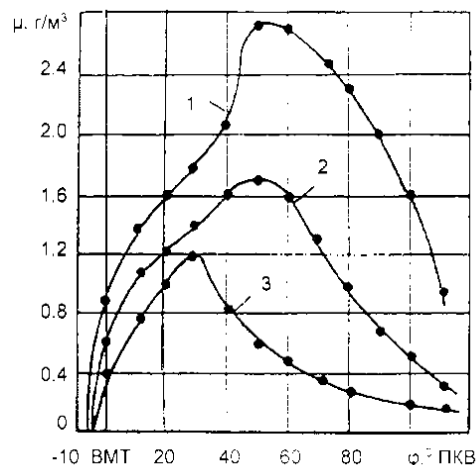


Рис. 2. Изменение концентрации частиц сажи в КС дизеля 8 ЧН 13/14 при испытании по нагрузочной характеристике: 1 – $P_{me}=0.61$ МПа; 2 – $P_{me}=0.36$ МПа; 3 – $P_{me}=0.12$ МПа.

Из него видно, что концентрация частиц сажи увеличивается с ростом нагрузки, максимальные ее значения в диапазоне изменения нагрузки от $P_{me}=0.12$ МПа до $P_{me}=0.61$ МПа отличаются в 2,2 раза. Значения интегральной степени черноты пламени, рассчитанные по методике, ранее представленной в [4,5], показана на рис. 3.

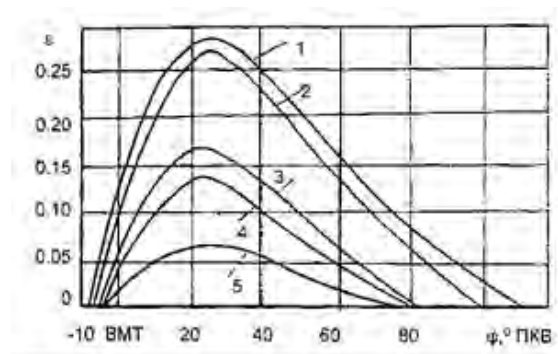


Рис. 3. Изменение интегральной степени черноты пламени в КС дизеля 8 ЧН 13/14 в зависимости от нагрузки: 1 – $P_{me}=0.61$ МПа; 2 – $P_{me}=0.49$ МПа; 3 – $P_{me}=0.36$ МПа; 4 – $P_{me}=0.24$ МПа; 5 – $P_{me}=0.12$ МПа.

Как и следовало ожидать с ростом нагрузки интегральная степень черноты пламени возрастает, достигая своего максимального значения в период активного тепловыделения в КС 20 – 25° поворота коленчатого вала (ПКВ) после верхней мертвой точки (ВМТ). Для сравнения на рис. 4 представлены данные по интегральной степени черноты пламени, полученные авторами статьи, для судового среднеоборотного дизеля 6ЧН 24/36 [4].

При этом для судового высокооборотного дизеля 8ЧН 13/14 и судового среднеоборотного дизеля 6ЧН 24/36 использовалась одинаковая расчетная методика [4, 5]. Анализ рис. 3 и 4 показывает, что изменение интегральной степени черноты пламени в функции угла ПКВ при испытании указанных дизелей по нагрузочной характеристике имеет практически идентичный вид, отличаясь лишь количественно.

Последнее объясняется различием в параметрах рабочего процесса этих дизелей.

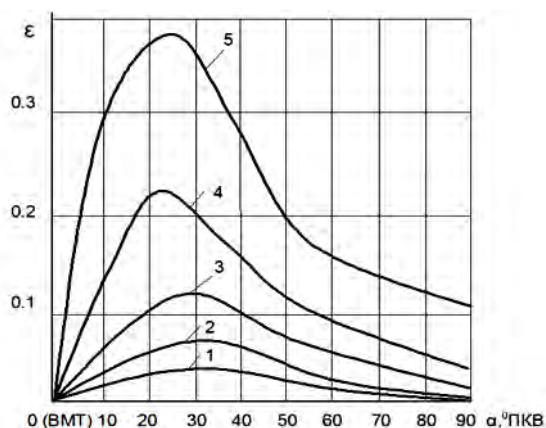


Рис. 4. Изменение интегральной степени черноты пламени при испытании судового дизеля 6 ЧН 24/36 по нагрузочной характеристике: 1 – холостой ход; 2 – 25% от $N_{e,ном}$; 3 – 50%; 4 – 75%; 5 – 100%

Необходимо отметить, что ранее в [5] для дизеля 8ЧН 13/14 была получена зависимость, аппроксимирующая функцию $\epsilon = f(\varphi)$ с точностью 8 – 10%. Эта зависимость имеет вид

$$\epsilon = 1 - \exp(-\psi P_r T_r L), \quad (2)$$

где $\psi = 1,24 \cdot 10^{-4}$ – эмпирический коэффициент; P_r , T_r – давление и температура рабочего тела в КС соответственно; L – эффективная длина пути луча. Их сравнение показано на рис. 5.

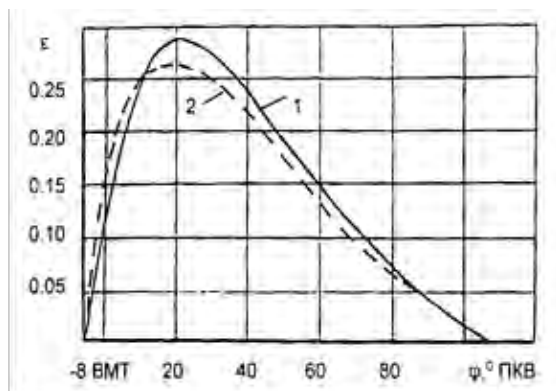


Рис. 5. Сравнение значений интегральной степени черноты пламени для дизеля 8 ЧН 13/14: 1 – $\epsilon=f(\varphi)$, полученная на основе экспериментальных данных 2 – аппроксимация.

Зависимость (2) может быть использована на стадии проектирования судовых высокооборотных дизелей, сходных по параметрам рабочего процесса с дизелем 8ЧН 13/14.

Локальный характер температуры пламени, его степень черноты и концентрация частиц сажи в КС подтверждается и расчетными данными, полученными с помощью трехмерного математического моделирования процессов горения топлива и теплообмена [6 – 14]. Часть этих расчетных данных [12] представлено на рис. 6 – 9.

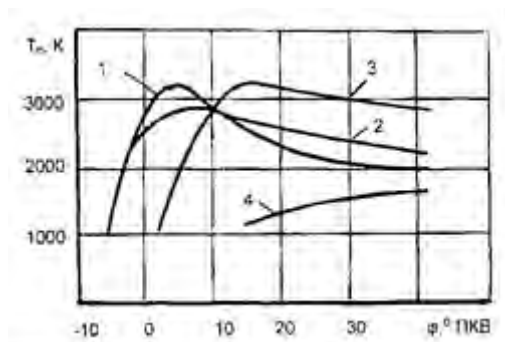


Рис. 6. Зональные температуры пламени в КС дизеля 1ЧН 13,5/14, $n=1500$ мин⁻¹: 1 – 4 – номера зон в КС.

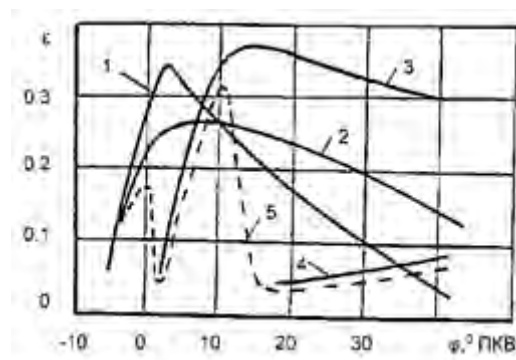


Рис. 7. Зональная и средняя по КС интегральная степень черноты пламени: 1 – 4 – номера зон в КС; 5 – средняя по КС интегральная степень черноты пламени

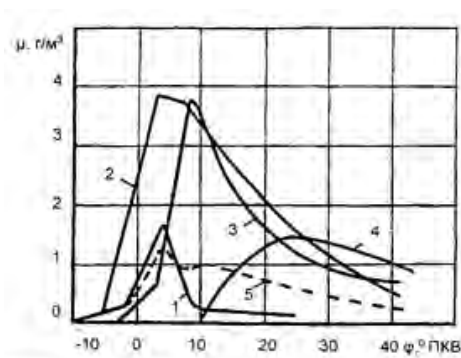


Рис. 8. Зональная и средняя по КС концентрация частиц сажи: 1 – 4 – номера зон в КС; 5 – средняя по КС концентрация частиц сажи

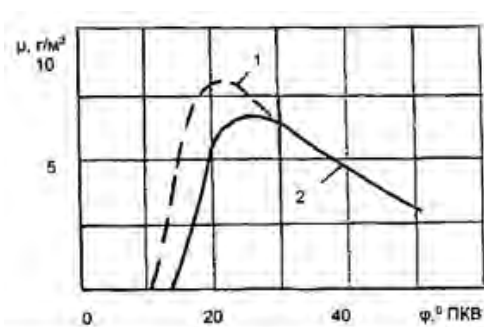


Рис. 9. Расчетные значения концентрации частиц сажи в КС дизеля при различных углах опережения подачи топлива: 1 – угол подачи топлива 10° ПКВ до ВМТ; 2 – 20° ПКВ до ВМТ

Известно, что процесс образования и выгорания частиц сажи при сжигании углеводородных топлив протекают одновременно [15 – 19]. Поэтому регулировочные параметры, которые оказывают влияние на протекание рабочего процесса судовых дизелей, например, угол опережения подачи топлива, естественно, вызывают изменение и текущей концентрации частиц сажи в КС. Это положение иллюстрируется на рис. 9

Влияние энергетических параметров излучения пламени на характеристики локального радиационного теплообмена в камере сгорания

Анализ представленных выше опытных и расчетных данных по энергетическим параметрам излучения пламени (см. рис. 1 – 9) позволяет отметить следующее. Температура пламени и его степень черноты имеют локальный характер и с ростом нагрузки дизеля возрастают. Максимальные значения температуры пламени приходится на центральную часть поршня и крышки цилиндра. Заметим, что исследованные авторами дизели 8 ЧН 13/14 и 6 ЧН 24/36 имеют центральное расположение форсунки и двухклапанную крышку цилиндра. В изменении концентрации частиц сажи в КС с ростом нагрузки прослеживается такая же тенденция.

В части расчетных данных по энергетическим параметрам излучения пламени, показанных на рис. 6–9 необходимо отметить следующие особенности. Процесс сгорания является основным в формировании энергетических параметров излучения пламени в КС дизеля. Расчетные локальные значения этих параметров можно получить лишь с использованием современных пакетов прикладных программ, предварительно задавшись адекватными начальными условиями [6]. Заметим, что процессы сгорания и локального радиационного теплообмена имеют выраженный нестационарный характер. Верификация полученных с их помощью результатов требует надежных экспериментальных данных, число которых по локальному радиационному теплообмену в КС судовых дизелей к настоящему времени весьма ограничено. В качестве примера на рис. 10 представлено изменение локального радиационного теплового потока для поверхностей, образующих КС высокооборотного дизеля типа 12ЧН 13,5/15,5 [5]. При испытании указанного дизеля по одному датчику радиационного теплового потока было установлено в крышку цилиндра, поршень и втулку. Основу этих датчиков составляли поверхностные термопары, закрытые сапфировым окном, они измеряли колебания температуры поверхности деталей КС, обусловленные тепловым потоком. Полученные экспериментальные значения локальной плотности радиационного теплового потока являются весьма ценными, тем не менее они не позволяют прояснить картину локального теплового нагружения конкретной детали, например, поршня за счет потока излучения. На стадии проектирования судовых дизелей очень важно определить наиболее нагруженные в тепловом отношении участки поверхностей деталей, образующих КС. Это можно сделать с помощью зонального метода расчета теплообмена излучением, который был использован авторами настоящей статьи ранее в работе [20].

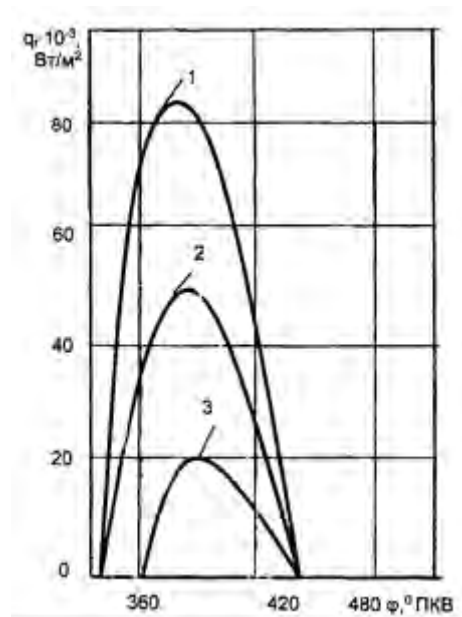


Рис. 10. Изменение локального радиационного теплового потока на поверхности деталей КС дизеля 12 ЧН 13,5/15,5, $n = 960 \text{ мин}^{-1}$: 1 – крышка цилиндра; 2 – поршень; 3 – втулка цилиндра

На рис. 11 и 12, заимствованных из указанной работы, приведены для примера изменения геометрических угловых коэффициентов и результирующих потоков излучения для поверхности поршня судового среднеоборотного дизеля 6ЧН 24/36.

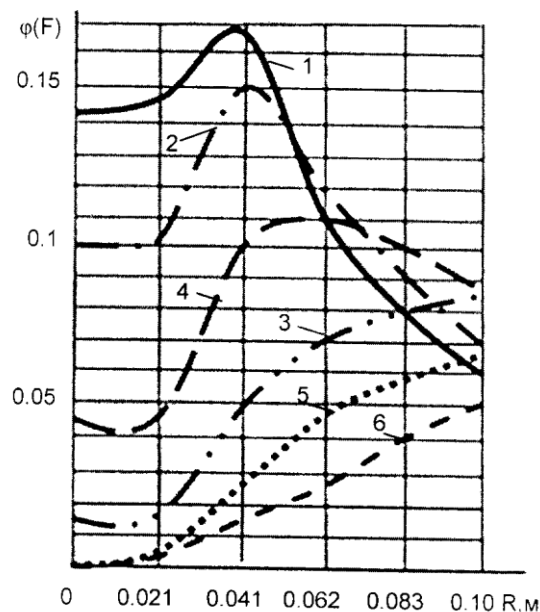


Рис. 11. Изменение геометрического углового коэффициента излучения для сферической выемки в поршне судового дизеля 6ЧН 24/36: 1 – ВМТ; 2 – $\alpha = 20^\circ$ ПКВ после ВМТ; 3 – $\alpha = 40^\circ$; 4 – $\alpha = 60^\circ$; 5 – $\alpha = 80^\circ$; 6 – $\alpha = 100^\circ$

Влияние эффективных потоков излучения на величину результирующих радиационных тепловых потоков, как подробно показано в [5], незначительно и им можно пренебречь.

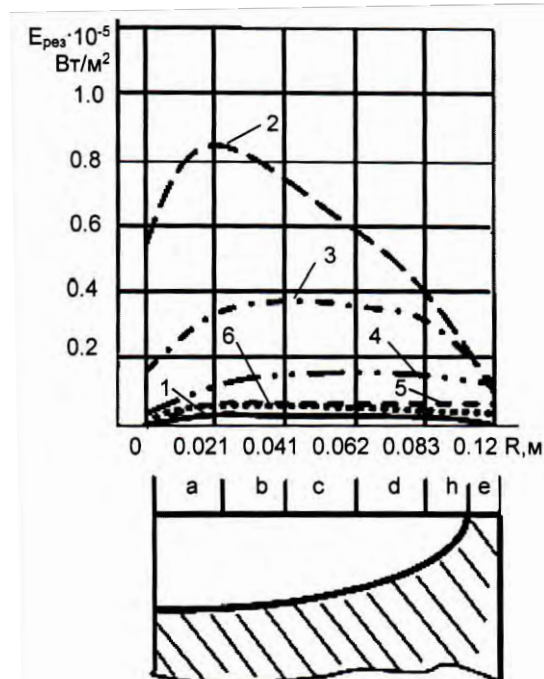


Рис. 12. Результирующий поток излучения на поршень по радиусу при нагрузке 100%: а – зона 1; б – зона 2; с – зона 3; д – зона 4; h – зона 5; е – кольцо: 1 – ВМТ; 2 – $\alpha=200$ ПКВ после ВМТ; 3 – $\alpha=400$; 4 – $\alpha=600$; 5 – $\alpha=800$; 6 – $\alpha=1000$

Анализ данных, представленных на рис. 11 и 12, показывает, что в период активного тепловыделения в КС (ВМТ – 40° ПКВ после ВМТ) наиболее нагруженный в тепловом отношении оказывается центральная часть поверхности сферической выемки в поршне. Это подтверждается и практикой мирового судового дизелестроения, учитывающей многолетний опыт проектирования и эксплуатации судовых дизелей [21].

Следовательно, при оценке локальных радиационных тепловых потоков в КС судовых дизелей на стадии проектирования необходимо учитывать не только значения энергетических параметров излучения пламени, но и форму КС и изменение геометрических угловых коэффициентов излучения.

Заключение

Представленные и проанализированные в статье экспериментальные и расчетные данные по энергетическим параметрам излучения пламени значительно дополняют банк данных по радиационному теплообмену в дизелях. Они могут быть использованы для верификации как уже существующих, так и вновь разрабатываемых математических моделей процесса локального радиационного теплообмена, а также для оценки теплового и напряженно-деформированного состояния деталей КС судовых дизелей на стадии проектирования.

Литература

1. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991, 432 с.
2. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975, 934 с.
3. Modest M.F. Radiative heat transfer. New York: Academic Press, 2003, 822 p.
4. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Оценка спектральной оптической толщины пламени в камере сгорания судового дизеля // Морские интеллектуальные технологии, 2020, № 1, Т.2, С. 91 – 94.
5. Руднев Б.И. Процессы локального теплообмена в камере сгорания дизелей. Владивосток: Дальнаука, 2000, 221 с.
6. Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Зеленцов А.А. Трехмерное моделирование нестационарных тепловых процессов в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 85 с.
7. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 472 с.
8. Crary B., Kikuta K., Chikahisa T. et al. Causes of calculation instabilities and their countermeasures for KIVA, a three-dimensional program for combustion and fluid in I.C. engines // Mem. Fac. Eng. Hokkaido Univ., 1992, V.18, №3, P. 1 – 13.
9. Chang S.L., Rhee K.T. Computation of radiation heat transfer in diesel combustion // SAE Preprints 1983, №831332, P. 171 – 185.
10. Collins M.W., Stasiek J. The application of transformational zone method to the calculation of radiation transfer inside a piston-cylinder system // Int. J. Heat and Fluid Flow, 1992, V.13, №4, P. 380 – 389.
11. Yan J., Borman G.L. Analysis and in-cylinder measurements of particulate radiant emissions and temperature in direct injection Diesel engine // SAE Preprints, 1988, №881315, 22 p.
12. Zhou Q.B., Wei X.Y., Zhu T.Z., Wang R.S. The study of heat radiation transfer process in D.I. Diesel engine // Proceedings 19th International Symposium "Heat and Mass transfer in gasoline and diesel engines". Dubrovnik, Yugoslavia, 1987, P. 175 – 184.
13. Whitehouse N.D., Fu H., Dannish S.A.M. et al. An estimate of local instantaneous conditions in a diesel engine based on sampled data for local constituents and radiative and convective heat transfer // Proceedings 19th International Symposium "Heat and Mass transfer in gasoline and diesel engines". Dubrovnik, Yugoslavia, 1987, P. 109 – 122.
14. Kostin A.K., Rudnev B.I. Radiative heat transfer in a diesel cylinder an experiment and method of calculation // Proceedings 19th International Symposium "Heat and Mass transfer in gasoline and diesel engines". Dubrovnik, Yugoslavia, 1987, P. 439 – 448.
15. Бакиров Ф.Г., Захаров В.М., Полещук И.З., Шайхутдинов З.Г. Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив. М.: Машиностроение, 1989, 128 с.
16. Теснер П.А. Образование сажи при горении // Физика горения и взрыва, 1979, №2, С. 3 – 13.

17. Farmer F., Edelman R., Wong E., Particulate carbon formation during combustion. N.-Y.-L.: Plenum Press, 1981, P. 229 – 317.
18. Haynes B.S., Wagner H.C. Soot formation // Progress in energy and combustion science, 1981, Vol. 17, №4, P. 229 – 273.
19. Magnussen B.F., Hiertager B.H. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // 16th Symposium on combustion, Cambridge, 1976, P.719 – 729.
20. Руднев Б.И., Повалякина О.В. Локальные оптико-геометрические характеристики и результирующие потоки излучения в камере сгорания судового дизеля // Морские интеллектуальные технологии, 2018, № 4 (42), Т.5, С. 90 – 94.
21. Конкс Г.А., Лашко В.А. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта. М.: Машиностроение, 2005, 512 с.

References

1. Blokh A.G., ZHurvlev YU.A., Ryzhkov L.N. Teploobmen izlucheniem. Spravochnik [Radiative heat transfer. Handbook]. M.: ENergoatomizdat, 1991, 432 s.
2. Zigel' R., KHauehll Dzh. Teploobmen izlucheniem [Radiative heat transfer]. M.: Mir, 1975, 934 s.
3. Modest M.F. Radiative heat transfer. New York: Academic Press, 2003, 822 p.
4. Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Otsenka spektral'noj opticheskoy tolshhiny plameni v kamere sgoraniya sudovogo dizelya [Estimation spectral optical thickness of flame in marine diesel combustion chamber] // Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2020, № 1, T.2, S. 91 – 94.
5. Rudnev B.I. Protssesy lokal'nogo teploobmena v kamere sgoraniya dizelej [Processes local heat transfer in diesel combustion chamber]. Vladivostok: Dal'nauka, 2000, 221 s.
6. Kavtaradze R.Z., Onishhenko D.O., Zelentsov A.A. Trekhmernoe modelirovanie nestatsionarnykh teplofizicheskikh protsessov v porshnevnykh dvigatelyakh [Three dimension modeling non-stationary heat-physical of processes in piston of engines]. M.: Izd-vo MGTU im. N.EH. Baumana, 2012, 85 s.
7. Kavtaradze R.Z. Lokal'nyj teploobmen v porshnevnykh dvigatelyakh [Local heat transfer in piston engines]. M.: Izd-vo MGTU im. N.EH. Baumana, 2007, 472 s.
8. Crary B., Kikuta K., Chikahisa T. et al. Canses of calculation instabilities and their counterterm – casures for KIVA, a three-dimensional program for combustion and fluid in I.C. engines // Mem. Fac. Eng. Hokkaido Univ., 1992, V.18, №3, R. 1 – 13.
9. Chang S.L., Rhee K.T. Computation of radiation heat transfer in diesel combustion // SAE Preprints 1983, №831332, P. 171 – 185.
10. Collins M.W., Stasiek J. The application of transformational zone method to the calculation of radiation transfer inside a piston-cylinder system // Int. J. Heat and Fluid Flow, 1992, V.13, №4, P. 380 – 389.
11. Yan J., Borman G.L. Analysis and in-cylinder measurements of particulate radiant emissions and temperature in direct injection Diesel engine //SAE Preprints, 1988, №881315, 22 p.
12. Zhou Q.B., Wei X.Y., Zhu T.Z., Wang R.S. The study of heat radiation transfer process in D.I. Diesel engine // Proceedings 19th International Symposium "Heat and Mass transfer in gasoline and diesel engines". Dubrovnik, Yugoslavia, 1987, P. 175 – 184.
13. Whitehouse N.D., Fu H., Dannish S.A.M. et al. An estimate of local instantaneous conditions in a diesel engine based on sampled data for local constituents and radiative and convective heat transfer // Proceedings 19th International Symposium "Heat and Mass transfer in gasoline and diesel engines". Dubrovnik, Yugoslavia, 1987, P. 109 – 122.
14. Kostin A.K., Rudnev B.I. Radiative heat transfer in a diesel cylinder an experiment and method of calculation // Proceedings 19th International Symposium "Heat and Mass transfer in gasoline and diesel engines". Dubrovnik, Yugoslavia, 1987, P. 439 – 448.
15. Bakirov F.G., Zakharov V.M., Poleshhuk I.Z., SHajkhutdinov Z.G. Obrazovanie i vygoranie sazhi pri szhigani uglevodorodnykh topliv [Fomation and combustion of soot about combustion hydrocarbon of fuels]. M.: Mashinostroenie, 1989, 128 s.
16. Tesner P.A. Obrazovanie sazhi pri gorenii [Formation of soot about combustion] // Fizika goreniya i vzryva, 1979, №2, S. 3 – 13.
17. Farmer F., Edelman R., Wong E., Particulate carbon formation during combustion. N.-Y.-L.: Plenum Press, 1981, P. 229 – 317.
18. Haynes B.S., Wagner H.C. Soot formation // Progress in energy and combustion science, 1981, Vol. 17, №4, P. 229 – 273.
19. Magnussen B.F., Hiertager B.H. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // 16th Symposium on combustion, Cambridge, 1976, P.719 – 729.
20. Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Lokal'nye optiko-geometricheskie kharakteristiki i rezul'tiruyushhie potoki izlucheniya v kamere sgoraniya sudovogo dizelya [The local optical-geometrical data and resulting radiation heat fluxes in marine diesel combustion chamber] // Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2018, № 4 (42), T.5, S. 90 – 94.
21. Konks G.A., Lashko V.A. Mirovoe sudovoe dizelestroenie. Kontseptsii konstruirovaniya, analiz mezhdunarodnogo opyta [World marine diesel construction Conception of design, analysis international of experience]. M.: Mashinostroenie, 2005, 512 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

Руднев Борис Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры холодильной техники, кондиционирования и теплотехники, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток ул. Луговая, 52Б, e-mail: povalichina@mail.ru

Boris I. Rudnev, Dr.Sci. (Eng), Professor, Professor of Department of refrigeration equipment, condition and heat transfer, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, St. Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: povalichina@mail.ru

Повалихина Ольга Владимировна, доцент, доцент кафедры холодильной техники, кондиционирования и теплотехники, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток ул. Луговая, 52Б, e-mail: povalichina@mail.ru

Olga V. Povalikhina, assistant professor, assistant professor of Department of refrigeration equipment, condition and heat transfer, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, St. Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: povalichina@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 07.12.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 11.01.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 17.01.2024.

Научная статья

УДК 621.431.74.016

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.017>

Датчик радиационного теплового потока и устройство для его установки в крышке цилиндра судового высокооборотного дизеля

Руднев Б.И.¹ povalichina@mail.ru, Повалихина О.В.¹ povalichina@mail.ru¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. Повышенный уровень тепловой напряженности деталей, образующих камеру сгорания, значительно увеличивает сроки проведения исследовательских и доводочных работ при создании новых и совершенствовании уже существующих моделей судовых высокооборотных дизелей. Успешное решение задачи о сокращении сроков указанных работ во многом определяется использованием в них приборов и измерительных комплексов, обладающих высоким уровнем метрологических характеристик. Отмечено, что максимальная величина радиационного теплового потока в течение рабочего цикла достигает в современных судовых дизелях 45 – 50% от суммарного теплового потока, в среднем за рабочий цикл она равна 25 – 35 %. Это подтверждает необходимость ее достоверной экспериментальной оценки. Целью настоящей статьи является представление и обсуждение конструктивных особенностей специального датчика для измерения радиационного теплового потока и устройства для его установки в крышке цилиндра судового высокооборотного дизеля типа 8 ЧН 13/14. Приведены также основные метрологические характеристики датчика радиационного теплового потока и дана оценка погрешностей при его использовании в условиях камеры сгорания. Представленные в статье экспериментальные и расчетные данные по метрологическим характеристикам датчика радиационного теплового потока и конструктивным особенностям устройства для его установки в крышке цилиндра позволяют еще на стадии проектирования осуществить обоснованный подход к опытному определению локального радиационного теплового потока на поверхностях деталей, образующих камеру сгорания. Это существенно повышает качество экспериментальных исследований и доводочных работ по созданию новых перспективных моделей судовых высокооборотных дизелей.

Ключевые слова: судовой высокооборотный дизель, камера сгорания, датчик радиационного теплового потока, метрологические характеристики.

Для цитирования: Руднев Б.И., Повалихина О.В. Датчик радиационного теплового потока и устройство для его установки в крышке цилиндра судового высокооборотного дизеля, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 142—146. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.017

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.017>

Appliance of radiative heat flux and device for its installation in cylinder cap of marine high speed diesel

Boris I. Rudnev¹ povalichina@mail.ru, Olga V. Povalikhina¹ povalichina@mail.ru¹Far Eastern State Technical Fisheries University, Russian Federation

Abstract. Elevational level of thermal power of details of combustion chamber considerably expand terms of leading investigation and drive works by designing modern and improvement yet existical models of marine high speed diesels. Successful solution of task about terms contraction of these works throughout is determined using in them apparatuses and measurable complexes enjoying high level metrological characteristics. Maximum value of radiative heat flux period of working cycle arrives in modern marine diesels 45 – 50% per cent from total heat flux, in medium for working cycle equally 25 – 35 per cent are informed. It confirms necessity its correct experimental evaluation. Purpose of this article is presentation and discussion of constructive features of special appliance for measurement of radiative heat flux and device for its installation in cylinder cap marine high speed diesel type 8ChN 13/14. Base metrological characteristics of radiative heat flux appliance and evaluation errors by its using in conditions of combustion chamber are given. Represented in article experimental and calculation data of metrological characteristics of radiative heat flux appliance and constructive features of device for its installation in cylinder cap allow else on during design to realize correct approach to experimental determining of local radiative heat flux on surfaces of combustion chamber details. It respectable rise quality of experimental investigations and drive of works for designing of modern perspective models of marine high speed diesels.

Key words: marine high speed diesel, combustion chamber, appliance of radiative heat flux, metrological characteristics.

For citation: Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Appliance of radiative heat flux and device for its installation in cylinder cap of marine high speed diesel, Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 142—146. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.017

Введение

Высокий уровень теплонапряженности деталей, образующих камеру сгорания (КС), значительно увеличивает сроки проведения исследовательских и доводочных работ при создании новых и совершенствовании уже существующих моделей судовых высокооборотных дизелей [1 – 10]. Сокращение сроков указанных выше работ в основном определяется использованием в них приборов и измерительных комплексов, обладающих высоким уровнем метрологических характеристик [11 – 13]. Следует отметить, что максимальная величина радиационного теплового потока в течение рабочего цикла достигает в современных судовых дизелях 45 – 50% от суммарного теплового потока, в среднем за рабочий цикл она равна 25 – 35 % [3, 6, 8]. Это подтверждает необходимость ее достоверной экспериментальной оценки. Целью настоящей статьи является представление и обсуждение конструктивных особенностей датчика радиационного теплового потока и устройства для его установки в крышке цилиндра судового высокооборотного дизеля типа 8 ЧН 13/14. Также приведены основные метрологические характеристики указанного датчика и дана оценка погрешностей при его использовании в условиях камеры сгорания.

Датчик радиационного теплового потока и определение его метрологических характеристик

Для экспериментального определения локального радиационного теплового потока в настоящей работе использовался специальный датчик, разработанный авторами. Общий вид и поперечный разрез которого представлен соответственно на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Общий вид датчика радиационного теплового потока

В качестве измерительного элемента в этом датчике используется поверхностный железоникелевый термоприемник, конструкция которого подробно описана в [8], а его динамические характеристики представлены в [14]. Показанный на рис. 1 и 2 датчик регистрирует колебания температуры, обусловленные радиационным тепловым потоком. В качестве примера на рис. 3 представлена осциллограмма, полученная при испытании дизеля 8 ЧН 13/14 на режиме

номинальной нагрузки и частоте вращения коленчатого вала, равной 1700 имн⁻¹.

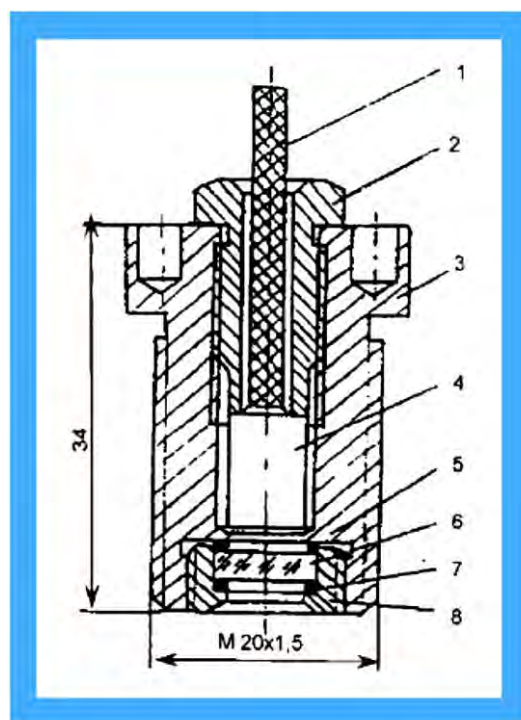


Рис. 2. Поперечный разрез датчика радиационного теплового потока: 1 – экранированные выводы от термоприемника; 2 – винт; 3 – корпус; 4 – поверхностный термоприемник; 5 и 7 – медные прикладки; 6 – сапфировый диск; 8 – поджимной стакан

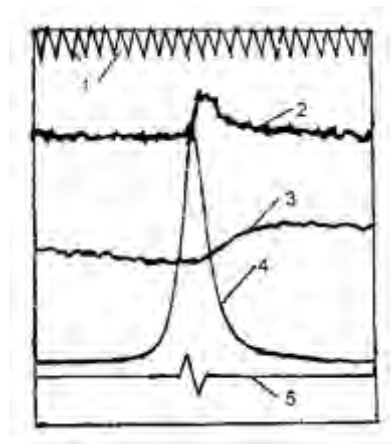


Рис. 3. Осциллограмма, полученная от датчика радиационного теплового потока: 1 – отметки времени длительностью 0,001 с; 2 – колебание температуры, обусловленное радиационным тепловым потоком и равное 1,2°C; 3 – колебание температуры, обусловленное суммарным тепловым потоком и равное 4,2°C; 4 – индикаторная диаграмма; 5 – отметка верхней мертвой точки

Следует отметить, что обработка температурных колебаний, зарегистрированных датчиком радиационного теплового потока, аналогична

обработке температурных колебаний от суммарного теплового потока и выполняется на ЭВМ по одной и той же программе [8]. Принцип его действия основан на выделении из суммарного теплового потока радиационного с использованием окна из прозрачного для инфракрасного излучения материала. В датчике, предложенном в настоящей работе использовался лейкосапфир (Al_2O_3), диаметром 9 мм и толщиной 2 мм. Одна из главных трудностей экспериментального исследования радиационного теплового потока заключается в устранении загрязнения окна датчика сажей. Проверка метода обдува окна воздухом (давлением примерно 12 МПа) показала малую его эффективность [8]. Поэтому при проведении опытов было решено воспользоваться методикой измерений с отключением испытуемого цилиндра в период выхода на режим [15], обеспечившей надежную запись колебаний температуры в течение 1 – 2 мин после включения подачи топлива в исследуемый цилиндр. Этого времени вполне достаточно, чтобы произвести запись температурной кривой. При обработке осциллограмм для получения значений радиационного теплового потока необходимо учитывать следующие факторы: неполноту пропускания лучей окном из лейкосапфира, что можно оценить коэффициентом пропускания прозрачных материалов (для разработанного датчика он равен 0,89), неполноту телесного угла облучения горячего сая поверхностного термодатчика, различие в степени черноты поверхностей термодатчика и стенки КС в месте замера. Однако, покрыв чернотой поверхность термодатчика перед постановкой его в датчик, можно свести эти различия до пренебрежимо малой величины. Значения поправки на неполноту облучения горячего сая термодатчика можно рассчитать, используя результаты работы [16]. Учитывая, что колебания температуры в сале термодатчика вызывают лишь лучи, падающие под углом $\alpha_{\max}$ (см. рис. 4), величина ошибки вследствие диафрагмирования определяется значением отсекаемого диафрагмой радиационного теплового потока по зависимости

$$\delta_1 = \frac{\int_{\alpha=0}^{\alpha_{\max}} \int_{\beta=0}^{2\pi} J(\alpha, \beta) \cos \alpha \sin \alpha d\alpha d\beta}{\int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} J(\alpha, \beta) \cos \alpha \sin \alpha d\alpha d\beta} - 1 \quad (1)$$

где δ_1 – относительная ошибка измерения радиационного теплового потока вследствие диафрагмирования; $J(\alpha, \beta)$ – функция распределения интенсивности падающей энергии излучения в зависимости от полярных углов α, β .

Приняв $J(\alpha, \beta)$ не зависящей от полярных углов α и β и выполнив в (1) преобразования, получим

$$\delta_1 = \frac{-\cos 2\alpha_{\max} - 1}{2}. \quad (2)$$

Для предложенного датчика $\alpha_{\max} = 44,5^\circ$, $\delta_1 = -0,508$. Коэффициент облученности соответственно равен 0,492.

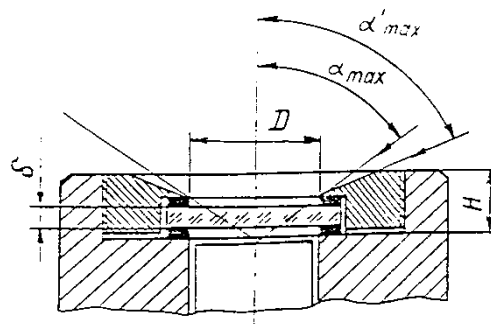


Рис.4. К расчету величины поправки на неполноту облучения горячего сая поверхностного термодатчика

Следует также учитывать и систематическую погрешность $\delta'_{\text{сист}}$. Она обусловлена лучистым взаимодействием в полости датчика, образованной внутренней поверхностью окошка и внешней поверхностью термодатчика. В работе [4] показано, что систематическая погрешность $\delta'_{\text{сист}}$ может быть определена по графику, представленному на рис. 5.

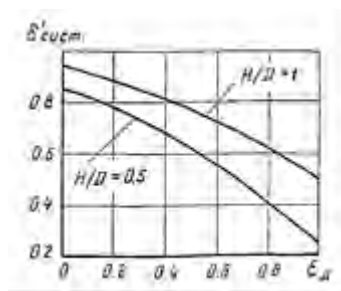


Рис.5. Систематическая погрешность измерения радиационного теплового потока: ϵ_d – степень черноты поверхности термодатчика в датчике

Для датчика, использованного авторами, $H/D = 0,42$, степень черноты поверхности термодатчика $\epsilon_d = 0,92$. Величина $\delta'_{\text{сист}}$, определенная с помощью графика на рис. 5, составляет 0,22.

Устройство для установки датчика радиационного теплового потока в крышке цилиндра судового высокооборотного дизеля

Для удобства проведения экспериментов в крышке цилиндра дизеля 8 ЧН 13/14 было установлено специальное устройство, представляющее собой цилиндрический колодец, идущий от ее огневой поверхности до колпака газораспределительного механизма. Общий вид указанного устройства показан на рис. 6 и отмечен на нем красной стрелкой.

Разработанное устройство позволяет весьма быстро устанавливать и при остановленном дизеле также быстро извлекать датчик радиационного теплового потока для очистки сапфирового окна. Кроме этого вместо указанного датчика в колодец можно установить обычный поверхностный термодатчик для измерения колебаний

температуры, обусловленных суммарным тепловым потоком.

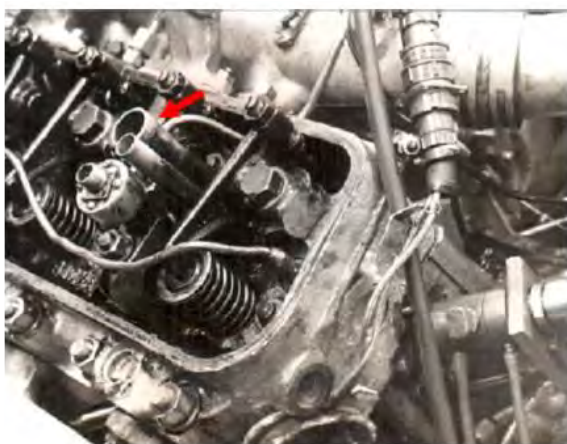


Рис.6. общий вид устройства для установки датчика радиационного теплового потока в крышке цилиндра дизеля 8 ЧН 13/14

Если же нет необходимости проводить измерения колебаний температуры в месте установки колодца, то в него заворачивается специальный длинный болт на медной прокладке и имеющий фаски под ключ.

Заключение

Расчетные и экспериментальные данные по метрологическим характеристикам датчика радиационного теплового потока и конструктивным особенностям устройства для его установки в крышке цилиндра, представленные в статье, дают возможность конструкторам и исследователям еще на стадии проектирования осуществить обоснованный подход к опытному определению локального радиационного теплового потока на поверхностях деталей, образующих КС. Это существенно повышает качество экспериментальных исследований и доводочных работ по созданию новых перспективных и конкурентноспособных моделей судовых высокооборотных дизелей

Литература

1. Овсянников М.К., Давыдов Г.А. Тепловая напряженность судовых дизелей. Л.: Судостроение, 1975, 256 с.
2. Овсянников М.К., Петухов В.А. Эксплуатационные качества судовых дизелей. Л.: Судостроение, 1982, 208 с.
3. Костин А.К., Ларионов В.В., Михайлов Л.И. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания. Справочное пособие. Л.: Машиностроение, 1979, 222 с.
4. Костин А.К., Пугачев Б.П., Кочинев Ю.Ю. работа дизелей в условиях эксплуатации. Справочник. Л.: Машиностроение, 1989, 284 с.
5. Чайнов Н.Д., Заренбин В.Г., Иващенко Н.А. Тепломеханическая напряженность деталей двигателей. М.: машиностроение, 1977, 152 с.
6. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 472с.
7. Чернышев Г.Д., Хачиян А.С., Пикус В.И. Рабочий процесс и теплонапряженность автомобильных дизелей. М.: Машиностроение, 1986, 216 с.
8. Руднев Б.И. Процессы локального теплообмена в камере сгорания дизелей. Владивосток: Дальнаука, 2000, 221 с.
9. Синенко Н.П., Гринсберг Ф.Г., Половинкин И.Д. и др. Исследование и доводка тепловозных дизелей. М.: Машиностроение, 1975, 184 с.
10. Крюков В.В., Будзинский В.В. Методы экспериментального исследования судовых малооборотных дизелей. Л.: Судостроение, 1971, 264 с.
11. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Контрольно-измерительный комплекс для исследования параметров рабочего процесса и радиационно-конвективного теплообмена в камере сгорания судового высокооборотного дизеля // Морские интеллектуальные технологии, 2022, №2, Часть 1, С. 73 – 78.
12. Гафуров Р.А., Соловьев В.В. Диагностика внутрикамерных процессов в энергетических установках. М.: Машиностроение, 1991, 272 с.
13. Канарчук В.Е., Чигринцев А.Д. Бесконтактная тепловая диагностика машин. М.: Машиностроение, 1987, 160 с.
14. Руднев Б.И., Повалихина О.В., Огай С.А. Экспериментальное определение динамических характеристик поверхностных термоприемников для исследования локального теплообмена в камере сгорания судового высокооборотного дизеля // Транспортное дело России, 2023, №4(167), С. 201 – 205.
15. Oguri T., Inaba S. Radiant heat transfer in Diesel engines //SAE Preprints, 1972, №720023, 19 p.
16. Адрианов В.Н. Радиометрический прибор для измерения лучистых потоков // Конвективный и лучистый теплообмен. М.: АН СССР, 1960, С. 145 – 149.

References

1. Ovsyannikov M.K., Davydov G.A. Teplovaya napryazhennost' sudovykh dizelej [Thermal power of marine diesel] L.: Sudostroenie, 1975, 256 s.
2. Ovsyannikov M.K., Petukhov V.A. EHkspluatatsionnye kachestva sudovykh dizelej [Exploational qualities of marine diesels] L.: Sudostroenie, 1982, 208 s.
3. Kostin A.K., Larionov V.V., Mikhajlov L.I. Teplonapryazhennost' dvigatelej vnutrennego sgoraniya. Spravochnoe posobie [Thermal power of internal combustion engines. Handbook] L.: Mashinostroenie, 1979, 222 s.
4. Kostin A.K., Pugachev B.P., Kochinev YU.YU. Rabota dizelej v usloviyakh ehkspluatatsii. Spravochnik [Work of diesels in conditions of exploation.handbook] L.: Mashinostroenie, 1989, 284 s.

5. CHajnov N.D., Zarenbin V.G., Ivashhenko N.A. Teplomekhanicheskaya napryazhennost' detalej dvigatelej [Thermal mechanics power of details engines] M.: Mashinostroenie, 1977, 152 s.
6. Kavtaradze R.Z. Lokal'nyj teploobmen v porshnevnykh dvigatelyakh [Local heat transfer in piston of engines] M.: Izd-vo MGTU im. N.EH. Bauman, 2007, 472s.
7. CHernyshev G.D., KHachiyan A.S., Pikus V.I. Rabochij protsess i teplonapryazhennost' avtomobil'nykh dizelej [Working process and thermal power of car diesels] M.: Mashinostroenie, 1986, 216 s.
8. Rudnev B.I. Protsessy lokal'nogo teploobmena v kamere sgoraniya dizelej [Processes of local heat transfer in diesels combustion chamber] Vladivostok: Dal'nauka, 2000, 221 s.
9. Sinenko N.P., Grinsberg F.G., Polovinkin I.D. i dr. Issledovanie i dovodka teplovoznnykh dizelej [Investigation and drive of locomotive engines] M.: Mashinostroenie, 1975, 184 s.
10. Kryukov V.V., Budzinskij V.V. Metody ehksperimental'nogo issledovaniya sudovykh malooborotnykh dizelej [methods of experimental investigation of marine small speed diesels] L.: Sudostroenie, 1971, 264 s.
11. Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Kontrol'no-izmeritel'nyj kompleks dlya issledovaniya parametrov rabocheho protsessa and radiatsionno-konvektivnogo teploobmena v kamere sgoraniya sudovogo vysokooborotnogo dizelya [Control measuremental complex for investigation of parameters working process and radiative convective heat transfer in combustion chamber of marine high speed diesel] // Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2022, №2, CHast' 1, S. 73 – 78.
12. Gafurov R.A., Solov'ev V.V. Diagnostika vnutrikamernykh protsessov v ehnergeticheskikh ustanovkakh [Diagnosis of inside chambers processes in power of devices] M.: Mashinostroenie, 1991, 272 s.
13. Kanarchuk V.E., CHigrinets A.D. Beskontaktnaya teplovaya diagnostika mashin [Without contact thermal diagnosis of machines] M.: Mashinostroenie, 1987, 160 s.
14. Rudnev B.I., Povalikhina O.V., Ogaj S.A. EHksperimental'noe opredelenie dinamicheskikh kharakteristik poverkhnostnykh termopriemnikov dlya issledovaniya lokal'nogo teploobmena v kamere sgoraniya sudovogo vysokooborotnogo dizelya [Experimental definition of dynamics characteristics surface thermometers for investigation of local heat transfer in marine high speed diesel combustion chamber] // Transportnoe delo Rossii, 2023, №4(167), S. 201 – 205.
15. Oguri T., Inaba S. Radiant heat transfer in Diesel engines //SAE Preprints, 1972, №720023, 19 p.
16. Adrianov V.N. Radiometricheskij pribor dlya izmereniya luchistykh potokov [Radiometric apparatus for measurement of radiative heat fluxes] // Konvektivnyj i luchistyj teploobmen. M.: AN SSSR, 1960, S. 145 – 149.

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

Руднев Борис Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры холодильной техники, кондиционирования и теплотехники, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток ул. Луговая, 52б, e-mail: povalichina@mail.ru

Boris I. Rudnev, Dr.Sci. (Eng), Professor, Professor of Department of refrigeration equipment, condition and heat transfer, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, St. Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: povalichina@mail.ru

Повалихина Ольга Владимировна, доцент, доцент кафедры холодильной техники, кондиционирования и теплотехники, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток ул. Луговая, 52б, e-mail: povalichina@mail.ru

Olga V. Povalikhina, assistant professor, assistant professor of Department of refrigeration equipment, condition and heat transfer, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, St. Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: povalichina@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 07.12.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 11.01.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 17.01.2024.

Научная статья

УДК 621.125

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.018>

Оптимизация точек отборов из турбины с помощью модели паротурбинной установки в среде моделирования simintech

Аполлова А.В.¹ an.vas.petrova@gmail.com, Романовская А.К.¹ moon.liight@yandex.ru¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Важным этапом современного проектирования является широкое применение математического моделирования, сущность которого состоит в замене исходного объекта математической моделью и дальнейшем изучении модели с помощью реализуемых на компьютерах вычислительных алгоритмов. Работа с моделью позволяет относительно быстро и без существенных затрат исследовать свойства объекта и его поведение в любых возможных ситуациях. В связи с этим для оптимизации точек отборов пара из турбины разработаны элементы и системы паротурбинной установки для плавучего энергоблока в среде динамического моделирования SimInTech, такие как проточная часть турбины с 12 ступенями и 3 отборами отработанного пара, конденсатор, три конденсатных насоса, подогреватель низкого давления, две секции подогревателя высокого давления, деаэрактор, три питательных насоса, промежуточный контур, состоящего из двух сетевых подогревателей ПС-450, и пиковый подогреватель ПС-450П. Смоделированы отборы отработанного пара после каждой ступени турбины и отбор свежего пара на дроссельно-увлажнительное устройство. Рассмотрен номинальный режим работы ПТУ, при котором отработанный пар на пиковый подогреватель не подается. Проведен анализ влияния расположения точек отбора пара на мощность турбины и коэффициент полезного действия паротурбинной установки. В результате проведенной работы наилучшие характеристики паротурбинной установки плавучего энергоблока обеспечивают отборы отработанного пара после 4, 6 и 9 ступеней.

Ключевые слова: плавучий энергоблок, паротурбинная установка, коэффициент полезного действия, точки отбора, отработанный пар, динамическая среда моделирования SimInTech

Для цитирования: Аполлова А.В., Романовская А.К. Оптимизация точек отборов из турбины с помощью модели паротурбинной установки в среде моделирования simintech, Морские интеллектуальные технологии, 2024. № 1 часть 1, С. 147—152. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.018

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.018>

Optimization of turbine sampling points using a steam turbine plant model in simulation environment simintech

Anastasia V. Apollova¹ an.vas.petrova@gmail.com, Anna K. Romanovskaya¹ moon.liight@yandex.ru¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. An important stage of modern production is the widespread use of mathematical modeling, the essence of which consists in replacing the original object with its image — a mathematical model — and further studying the model using computer-implemented computational algorithms. Working not with the object (process) itself, but with its model makes it possible to study its properties and behavior in any possible situations relatively quickly and without significant costs. In this regard, in order to achieve this goal, elements and systems of a steam turbine unit for a floating power unit in a SimInTech dynamic modeling environment have been developed, such as a flow part of a turbine with 12 stages and 3 exhaust steam selections, a condenser, three condensate pumps, a heater low pressure, two sections of a high pressure heater, a deaerator, three feed pumps an intermediate circuit consisting of two PS-450 network heaters, and a peak PS-450P heater. The sampling of spent steam after each turbine stage and the selection of fresh steam to the throttle-humidifying device are simulated. The nominal operating mode is considered, in which the exhaust steam consumption for the peak heater is 0. The analysis of the influence of the location of the steam extraction points on the turbine power and the efficiency of the steam turbine unit is carried out. As a result of the work carried out, the best characteristics of the steam turbine installation of the upgraded floating power unit are provided by the exhaust steam sampling after stages 4, 6 and 9.

Keywords: floating power unit, steam turbine unit, efficiency, sampling points, spent steam, dynamic modeling environment SimInTech

For citation: Anastasia V. Apollova, Anna K. Romanovskaya Optimization of turbine sampling points using a steam turbine plant model in simulation environment . Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 147—152. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.018

Введение

Одной из разновидностей атомных станций малой мощности являются плавучие атомные станции. В зависимости от вида вырабатываемой

продукции это могут быть электростанции, теплоэлектростанции (ПАТЭС), станции водоопреснения и пр.

Согласно современной терминологии под плавучей атомной станцией понимается комплекс,

Проведение исследования

В среде динамического моделирования SimInTech, разработанной ООО "ЗВ Сервис", были созданы такие элементы паротурбинной установки, как проточная часть турбины, главный конденсатор, питательные и конденсатные насосы, деаэратор, ПВД и ПНД. Из этих элементов создана модель паротурбинной установки, состоящая из: системы свежего пара, конденсатной группы оборудования, питательной группы оборудования, деаэратора, пикового подогревателя и промконтура [5,6,7].

В систему свежего пара входят проточная часть турбины с 12 ступенями и главный конденсатор КП-3200, конденсатная группа оборудования состоит из конденсатных насосов и ПНД. Питательные насосы и две секции ПВД образуют питательную группу оборудования. Деаэратор, пиковый подогреватель и сетевые подогреватели образуют соответственно систему деаэратора, пикового подогревателя и промконтура. Модель системы свежего пара представлена на рисунке 2.

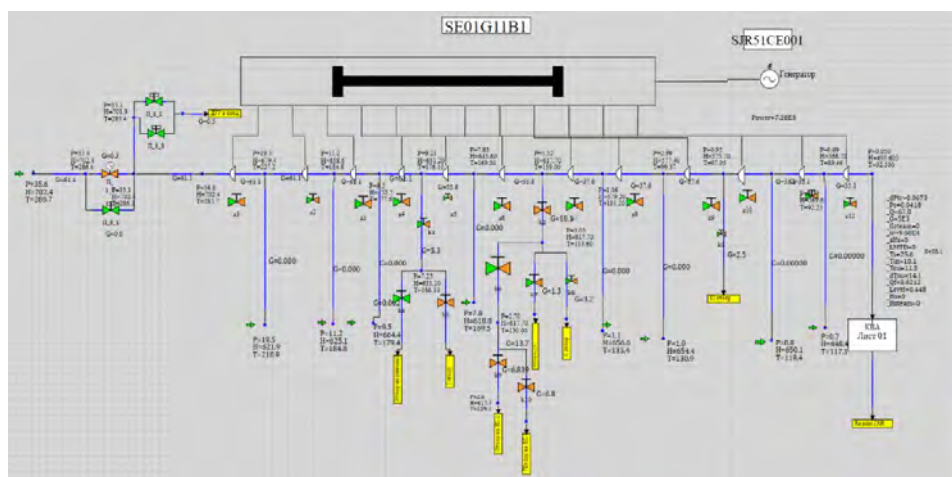


Рис. 2. Модель системы свежего пара

В статье рассматривается номинальный режим, поэтому пар на пиковый подогреватель не подается. В созданной модели турбины менялись точки отборов отработанного пара (согласно диаграмме $i-s$ рис.3) [5,6,7,8,9,10] и в результате определялась мощность турбины. КПД паротурбинной установки ПЭБ определялось по формуле:

$$\eta_{\text{ПТУ}} = \frac{N_{\text{ПТУ}}}{N_{\text{ЯЭУ}}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{ПТУ}}$ – мощность паротурбинной установки; $N_{\text{ЯЭУ}}$ – мощность ЯЭУ.

На рисунках 4-6 представлена зависимость КПД турбины от давления в отборах.

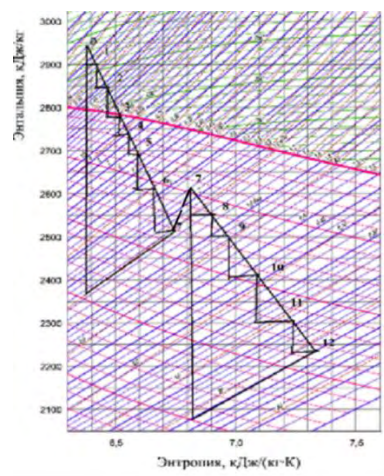


Рис. 3. Тепловой процесс расширения пара в турбине

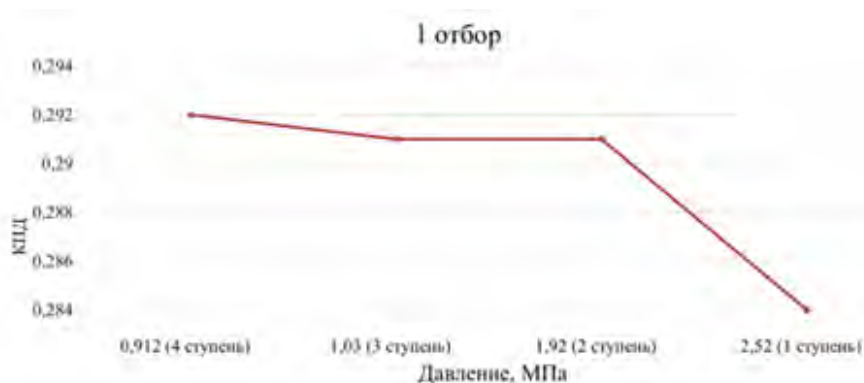


Рис.4. Влияние изменения точки 1 отбора на КПД ПТУ

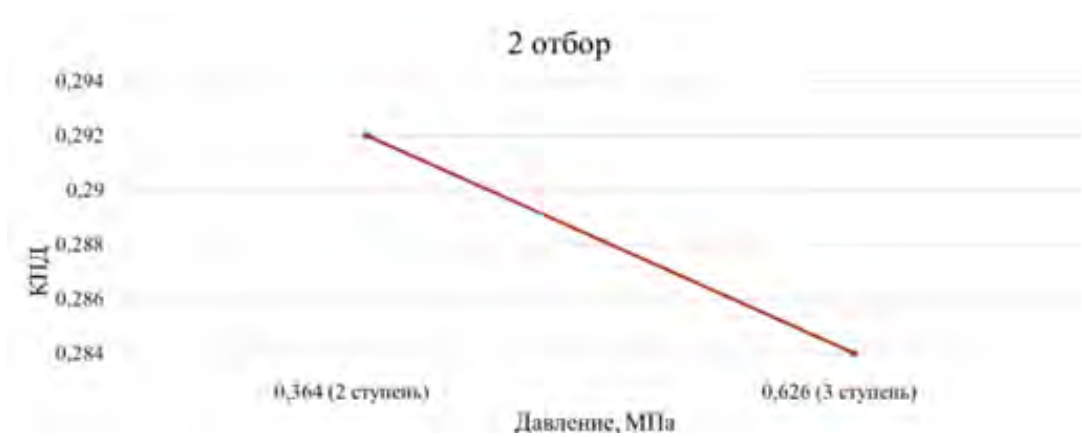


Рис.5. Влияние изменения точки 2 отбора на КПД ПТУ

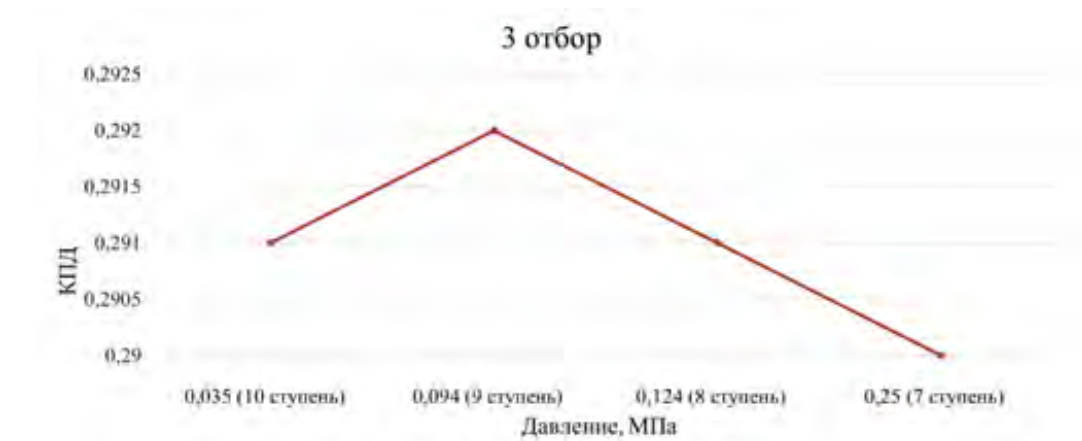


Рис.6. Влияние изменения точки 3 отбора на КПД ПТУ

Из рисунков 4-6 следует, что наибольший термический кпд турбины, составляющий 29,2%, достигается первым отбором пара после 4 ступени, вторым отбором за 6 ступенью и третьим отбором за 9 ступенью

КПД составляет 29,2%, что на 2% (относительных) больше, чем на проекте 22870.

Заключение

В среде SimInTech собрана модель паротурбинной установки ТК-35/38-3,4 плавучего энергоблока, выполнена отладка этой модели на

номинальный режим. С помощью модели паротурбинной установки получены оптимальные точки отборов пара из турбины после 4, 6 и 9 ступеней, обеспечивающие наибольший термический КПД установки, составляющий 29,2%, и наибольшую мощность турбины N=23 МВт. КПД составляет 29,2%, что на 2% (относительных) больше, чем на проекте 22870.

Параметры паротурбинной установки с наибольшим термическим КПД представлены в таблице 5.

Таблица 5

Параметры паротурбинной установки плавучего энергоблока

Наименование характеристики, размерность	Величина
Мощность турбины, МВт	23,00
Давление пара в первом отборе за 4 ступенью, МПа (кгс/см ²)	0,912 (9,2)
Давление пара во втором отборе за 6 ступенью, МПа (кгс/см ²)	0,357 (3,64)
Давление пара во втором отборе за 9 ступенью, МПа (кгс/см ²)	0,094 (0,96)
Температура ПВ на выходе из ПВД-3, °С	150
Расход из первого отбора, т/ч	18,4
Расход из второго отбора, т/ч	66
Расход из третьего отбора, т/ч	10
КПД ПТУ	0,292

Литература

1. Макеев Г.А. Создание плавучих энергетических блоков: современное состояние и варианты будущих проектов // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики. Т. 2. М.: Академ-Принт, 2015. С. 130-138;
2. Паротурбинная установка ТК-35/38-3,4с. Технические условия. ИРЕЦ 624121.001ТУ.
3. Хабаров С. П. Основы моделирования технических систем. Среда SimInTech: Учебное пособие / С. П. Хабаров, М. Л. Шилкина — СПб.: Издательство «Лань», 2019. — 120 с.
4. Сизов А.Н., Мусатов Е.А., Рогоза А.А. «Анализ некоторых результатов стендовых испытаний и проработка методики моделирования ПТУ ПЭБ АТЭС ММ»//ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. МАШИНОСТРОЕНИЕ-2012-№1-27-37
5. Болдырев О.Н. Судовые энергетические установки. Часть III. Комбинированные и ядерные энергетические установки: Учебное пособие. – Северодвинск: Севмашвтуз, 2007.
6. Королев В.И. Теплорасходная диаграмма пара и конденсата для анализа режимов использования теплофикационный паротурбинных установок//Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова-2018-Т.10-5-с 1025-1040;
7. Шарапов В.И. «Об одной из возможностей повышения энергетической эффективности теплофикационных турбоустановок»/В. И. Шарапов//Энергетик-2014-8-с.51-53;
8. Иванов В.А. «Режимы мощных паротурбинных установок: монография»/В.А.Иванов -Л.: Энергоатомиздат;
9. Владимиров А. А., Макеев Г. А. Опыт и перспективы создания плавучих энергетических блоков для освоения и развития территорий российского Севера и Дальнего Востока // Судостроение. — 2021. — № 4. — С. 56—60.;
10. Королев В. И. Успешное продвижение ПАТЭС в России и мире возможно при изменении подхода к проектированию и нормативно-правовой документации / В. И. Королев, В. Л. Михеев, А. Ю. Ластовцев// Материалы тезисов науч.-техн. конф. проф.-преп. сост., науч. сотр. и курсантов. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2011. — С. 348-349.;

References

1. Makeev G.A. Creation of floating power units: current state and options for future projects // Low-power nuclear power plants: a new direction in energy development. Т. 2. М.: Akadem-Print, 2015. P. 130-138
2. Steam turbine plant TK-35/38-3.4p. Technical conditions. IRETS 624121.001TU.
3. Khabarov S. P. Fundamentals of modeling of technical systems. SimInTech environment: Textbook / S. P. Khabarov, M. L. Shilkina — St. Petersburg: Publishing House "Lan", 2019. — 120 p.
4. Sizov A.N., Musatov E.A., Rogoza A.A. "Analysis of some results of bench tests and elaboration of a methodology for modeling the vocational technical training facility of the nuclear power plant APEC MM" // NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. MECHANICAL ENGINEERING-2012-№1-27-37
5. Boldyrev O.N. Ship power plants. Part III. Combined and nuclear power plants: A textbook. – Severodvinsk: Sevmashvtuz, 2007.
6. Korolev V.I. Heat flow diagram of steam and condensate for analyzing the modes of use of cogeneration steam turbine plants // Bulletin of the State University of Maritime and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov-2018-T.10-5-p 1025-1040
7. Sharapov V.I. "On one of the possibilities for increasing the energy efficiency of heating turbine units"/V. I. Sharapov//Energetic-2014-8-p.51-53;
8. Ivanov V.A. "Modes of powerful steam turbine plants: monograph" / V.A. Ivanov -L.: Energoatomizdat
9. Vladimirov A. A., Makeev G. A. Experience and prospects for creating floating energy units for the exploration and development of the territories of the Russian North and Far East // Shipbuilding. - 2021. - No. 4. - P. 56-60.;
10. Korolev V. I. Successful promotion of floating nuclear power plants in Russia and the world is possible by changing the approach to design and regulatory documentation / V. I. Korolev, V. L. Mikheev, A. Yu. Lastovtsev // Materials of scientific abstracts. tech. conf. prof.-teacher comp., scientific. co-workers and cadets. - SPb.: State Medical Academy named after. adm. S. O. Makarova, 2011. - P. 348-349.

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

Аполлова Анастасия Васильевна, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: an.vas.petrova@gmail.com, AuthorID: 887090

Anastasia V. Apollova, Dr.Sci. (Phys&Math), Assistant Professor, St. Petersburg Marine Technical University, 190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya str., 3, e-mail: an.vas.petrova@gmail.com, AuthorID: 887090

Романовская Анна Константиновна, студент группы 2263, Санкт-Петербургский морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: moon.liight@yandex.ru.

Anna K. Romanovskaya, student of group 2263, St. Petersburg Marine Technical University, 190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya str., 3, e-mail: moon.liight@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 05.04.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.02.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 15.02.2024.

Научная статья

УДК 504.3.054: 621.43.068.4

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.019>**Адсорбционная очистка отработавших газов судового энергетического оборудования**Туркин В.А.¹ turvla@mail.ru, Игнатенко Г.В.¹ ignatenko.georg@yandex.ru, Беляев В.В.¹ bv80@yandex.ru,Зубко С.С.¹ 1992sergeyz@mail.ru, Краевой А.И.¹ kraevoy03@mail.ru¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. Ужесточение требований международных и национальных норм к содержанию вредных веществ в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания (ДВС), установленных на различных видах транспорта, требует разработки современных технических и технологических решений, направленных на их очистку. Наиболее вредными компонентами отработавших газов являются оксиды азота, оксиды серы, окись углерода и несгоревшие углеводороды. При этом наибольшую техническую сложность представляет снижение концентрации оксидов углерода. Рассмотрен метод очистки отработавших газов от кислотных оксидов и твердых частиц с использованием механизма их адсорбции твердым веществом. Для этих целей разработано комплексное устройство очистки отработавших газов ДВС транспортного назначения. В основе работы предлагаемого устройства лежит технология адсорбционной очистки газов от оксидов углерода использованием в качестве адсорбента гранулированных доменных шлаков. Достоинствами метода являются отсутствие в конструкции устройства дорогостоящих катализаторов и расходуемых химических реагентов. Приведены результаты экспериментальной оценки эффективности данной технологии в предложенной пилотной установке. На основании экспериментальных исследований пилотной установки получены графические и математические зависимости эффективности извлечения оксидов углерода от объемного расхода отработавших газов. Получено, что минимальное значение эффективности извлечения СО из ОГ, равное 10,14 % будет иметь место при объемном расходе ОГ 66,92 м³/час, максимальное – 33,94 % при 19,52 м³/час. Для диоксида углерода минимальное значение эффективности его извлечения из отработавших газов, равное 80,81 % будет иметь место при расходе ОГ 19,52 м³/час, а максимальное, равное 89,15 % будет при 66,92 м³/час.

Ключевые слова: судовое энергетическое оборудование, экологическая безопасность, отработавшие газы, вредные вещества, очистка, адсорбция

Для цитирования: Туркин В.А., Игнатенко Г.В., Беляев В.В., Зубко С.С., Краевой А.И. Адсорбционная очистка отработавших газов судового энергетического оборудования, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 153—158. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.019

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.019>**Adsorption purification of exhaust gases from ship power equipment**Vladimir A. Turkin¹ turvla@mail.ru, George V. Ignatenko¹ ignatenko.georg@yandex.ru,Vladimir V. Belyaev¹ bv80@yandex.ru, Sergei S. Zubko¹ 1992sergeyz@mail.ru, Aleksey I. Kraevoy¹ kraevoy03@mail.ru¹Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Krasnodar region, Russian Federation

Abstract. Tightening the requirements of international and national standards for the content of harmful substances in the exhaust gases of internal combustion engines (ICEs) installed on various types of transport requires the development of modern technical and technological solutions aimed at their purification. The most harmful components of exhaust gases are nitrogen oxides, sulfur oxides, carbon monoxide and unburned hydrocarbons. In this case, the greatest technical difficulty is reducing the concentration of carbon oxides. A method for purifying exhaust gases from acid oxides and solid particles using the mechanism of their adsorption by solid matter is considered. For these purposes, a comprehensive device for purifying exhaust gases from internal combustion engines for transport purposes has been developed. The operation of the proposed device is based on the technology of adsorption purification of gases from carbon oxides using granulated blast furnace slag as an adsorbent. The advantages of the method are the absence of expensive catalysts and consumable chemical reagents in the design of the device. The results of an experimental assessment of the effectiveness of this technology in the proposed pilot installation are presented. Based on experimental studies of the pilot plant, graphical and mathematical dependences of the efficiency of carbon oxide extraction on the volumetric flow rate of exhaust gases were obtained. It was found that the minimum value of the efficiency of CO extraction from exhaust gas, equal to 10.14%, will occur at a volumetric flow rate of exhaust gas of 66.92 m³/hour, the maximum – 33.94% at 19.52 m³/hour. For carbon dioxide, the minimum value of the efficiency of its extraction from exhaust gases, equal to 80.81%, will occur at an exhaust gas flow rate of 19.52 m³/hour, and the maximum value, equal to 89.15%, will occur at 66.92 m³/hour.

Keywords: ship power equipment, environmental safety, exhaust gases, harmful substances, cleaning, adsorption

For citation: Vladimir A. Turkin, George V. Ignatenko, Vladimir V. Belyaev, Sergei S. Zubko, Aleksey I. Kraevoy, Adsorption purification of exhaust gases from ship power equipment, Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 153—158. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.019

Введение

В настоящее время происходит последовательное ужесточение требований к выбросам вредных веществ с отработавшими газами двигателей внутреннего сгорания, установленных на различных видах транспорта: автомобильном, водном, воздушном [1, 2, 3].

Уже сейчас нормы по выбросу вредных веществ настолько ужесточены, что возможности выполнения соответствующих требований только за счет организации рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания практически исчерпали свой резерв. Для достижения современных и перспективных требований законодательства требуются дополнительные (вторичные) мероприятия с более глубоким снижением концентраций вредных веществ в отработавших газах. С целью решения данной задачи рассмотрен метод очистки отработавших газов от кислотных оксидов и твердых частиц с использованием механизма их адсорбции твердым веществом в предложенном устройстве очистки отработавших газов ДВС [4].

Технология адсорбционного извлечения вредных веществ из продуктов сгорания органического топлива

Одним из наиболее перспективных методов снижения выбросов вредных оксидов с отработавшими газами (ОГ) ДВС является применение технологии, основанной на их поглощении установкой очистки. Адсорбция – это поглощение твердыми телами молекул извлекаемых веществ из газовой фазы посредством переноса, проникновения и поглощения твердым телом молекул газа извлекаемого вещества [5].

Основными видами адсорбентов являются активные угли, шлаковая пемза, алюмогели, силикагели, цеолиты и иониты. Адсорбенты для случая применения на транспорте должны обладать следующими характеристиками: иметь высокую адсорбционную способность, избирательность и механическую прочность, обладать способностью к восстановлению и иметь низкую стоимость [5].

Эффективность процесса адсорбции зависит от температуры, давления и от природы адсорбента и извлекаемого вещества. При этом количество адсорбированного вещества уменьшается при повышении температуры [6].

Процессы адсорбции впервые рассматривались в начале 1990-х годов как альтернатива процессам улавливания вредных веществ растворителями [7, 8, 9]. После этих исследований предпринимались значительные усилия по разработке адсорбционной технологии для улавливания вредных оксидов. На сегодняшний день наибольшие исследовательские усилия были направлены на разработку улучшенных адсорбентов с более высокой производительностью по отношению к оксидам, лучшей селективностью и лучшей устойчивостью к примесям [10].

Классические адсорбенты (углероды, оксиды алюминия, кремнеземы, цеолиты) и их модификации были оценены на предмет их потенциала в отношении улавливания вредных оксидов. Новые адсорбенты (металлоорганические

каркасы, гидроталькиты, адсорбенты на аминной основе, полимеры, высокотемпературные оксиды металлов) были исследованы на предмет их применения в ряде областей [11, 12].

Адсорбция является привлекательной технологией по ряду причин. Ее можно применить на любом промышленном предприятии и транспортном объекте, если адсорбционная колонна будет оптимизирована по занимаемой площади и стоимости. Адсорбция также характеризуется широким диапазоном изменения температуры и давления, вследствие чего можно использовать низко-, средне- и высокотемпературные адсорбенты. Оценка экономики и энергетики адсорбции по сравнению с абсорбцией показала снижение затрат в случае использования технологий адсорбционной очистки продуктов сгорания органического топлива [10].

Одними из методов снижения выбросов кислотных оксидов с отработавшими газами ДВС является предложенная научными работниками Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова (город Новороссийск) технология их адсорбционного извлечения, новизна которого подтверждена выдачей патента, описание которого приведено в литературе [13].

Извлечение вредных оксидов из потока отработавших в двигателе внутреннего сгорания газов осуществляется следующим образом. Продукты сгорания поступают в адсорбер, проходят заполненные гранулами доменных шлаков диаметром от 5 до 10 мм с модулем основности $M > 1$ секции. Проходя адсорбционные секции, продукты сгорания контактируют с гранулами шлаков, а находящиеся в них вредные оксиды адсорбируются на поверхности пор доменных шлаков. При падении активности гранул их подвергают регенерации промывкой водой при работающем ДВС. В коллекторе адсорбера собирается образующийся кислый конденсат и вода из адсорбента [13].

Экспериментальное исследование эффективности технологии адсорбционного извлечения вредных веществ из потока газов

Для проведения экспериментальных исследований была изготовлена показанная на рис. 1 трех секционная пилотная установка. В качестве источника отработавших газов (ОГ) использовался инжекторный ДВС 3МЗ-409 номинальной мощностью 105 кВт. Анализ состава отработавших газов производился газоанализатором testo 350.

В процессе экспериментов измерялись температура, концентрации и давление газового потока. Результаты полученных экспериментальных данных представлены в таблице 1.

На рис. 2 представлены зависимости содержания диоксида углерода CO_2 в отработавших газах двигателя на входе и выходе из экспериментальной установки в зависимости от объемного расхода отработавших газов ДВС.

Из графиков на рис. 2 следует, что на входе минимальное значение содержания CO_2 в отработавших газах, равное 10,88 % будет иметь место при расходе ОГ 19,52 м³/ч, максимальное – 12,47 % при 66,92 м³/ч. На выходе из установки после адсорбционного извлечения из отработавших газов

CO₂ их содержание будет: 2,09 % при 19,52 м³/ч; 1,35 % при 66,92 м³/ч.

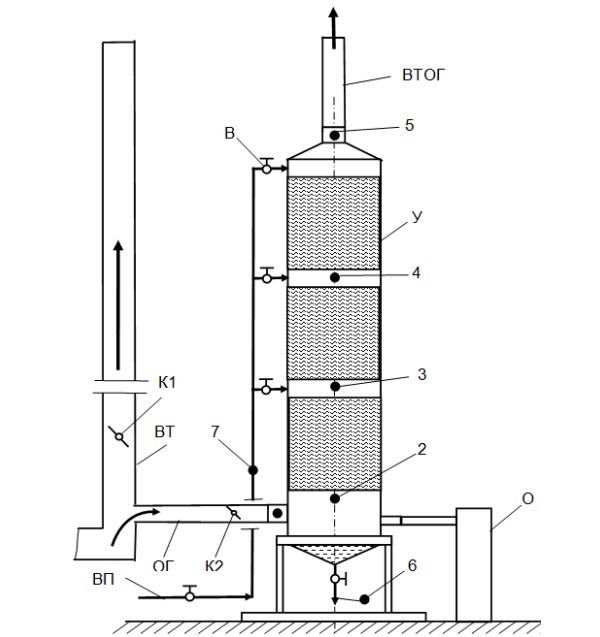


Рис. 1. Пилотная установка (У): ВТ – труба выхода ОГ помимо установки; О – генератор озона; ОГ – газоход для подвода ОГ к установке; ВП – трубопровод подачи воды; В – клапан; ВТОГ – газоход для отвода отработавших газов из установки; К1 – клапан выхлопной трубы; К2 – клапан отводного газохода; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – аналитические точки

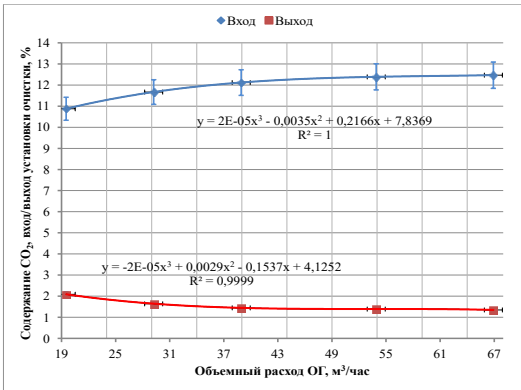


Рис. 2. Содержание CO₂ в отработавших газах на входе и выходе пилотной установки в зависимости от объемного расхода ОГ

На основании обработки приведённых в таблице 1 результатов экспериментов определена эффективность адсорбционной технологии извлечения диоксида углерода CO₂ и монооксида углерода СО из отработавших газов используемого двигателя внутреннего сгорания.

Эффективность адсорбционной технологии извлечения оксидов углерода определяется выражение:

$$e = 100 \cdot (y_H - y_K) / y_H, \%,$$

где y_H – начальное содержание СО или CO₂ в отработавших газах, %;

y_K – конечное содержание СО или CO₂ в отработавших газах, %.

Таблица 1

Результаты замеров параметров в пилотной установке (в числителе – значения параметров на входе, в знаменателе – на выходе из установки)

Измеряемый параметр	Номер эксперимента				
	1	2	3	4	5
Частота вращения коленчатого вала двигателя, мин ⁻¹	2000	2500	3000	3500	4000
Скорость ОГ, м/с	4,32	6,53	8,62	11,92	14,84
Объемный расход ОГ, м³/ч	19,52	29,23	38,94	53,92	66,92
Температура ОГ, °С	102/ 53,5	127,2/ 62,7	156/ 68,3	189,3/ 71,5	223,7/ 81,3
Содержание CO ₂ в ОГ, %	10,88/ 2,09	11,67/ 1,64	12,12/ 1,45	12,39/ 1,39	12,47/ 1,35
Эффективность извлечения CO ₂ из ОГ, %	80,81	85,91	88,01	88,82	89,15
Концентрация СО в ОГ, ppm	5876/ 3882	3475/ 2640	3497/ 2783	4186/ 3643	6528/ 5866
Эффективность извлечения СО из ОГ, %	33,94	24,02	20,41	12,96	10,14

Зависимость эффективности адсорбционной технологии извлечения оксидов углерода из отработавших газов двигателя от их объемного расхода показана на рисунках 3 (для диоксида углерода) и 4 (для монооксида углерода).

Из графика на рисунке 3 следует, что минимальное значение эффективности извлечения CO₂ из ОГ, равное 80,81 % будет иметь место при 19,52 м³/час, максимальное – 89,15 % при 66,92 м³/час.

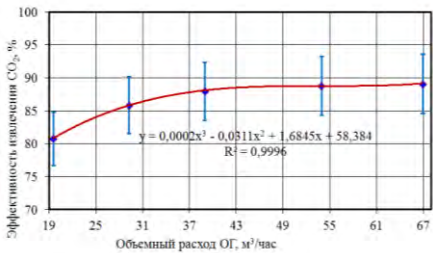


Рис. 3. Эффективность извлечения диоксида углерода в пилотной установке в зависимости от объемного расхода отработавших газов

Некоторый рост эффективности извлечения CO_2 из отработавших газов по мере увеличения их объемного расхода объясняется увеличением температуры и скорости отработавших газов. Так, при объемном расходе 66,92 м³/час скорость отработавших газов в установке будет составлять 14,84 м/с или в 3,4 больше, чем при 19,52 м³/час. Следовательно, поток отработавших газов будет иметь большую турбулентность, что будет способствовать увеличению его проникновения в поры гранулированных шлаков и увеличивать площадь контакта отработавших газов с поверхностью адсорбента.

Зависимость эффективности извлечения CO_2 у из отработавших газов двигателя от их объемного расхода x определится следующим выражением:

$$y = 2,0 \cdot 10^{-4}x^3 - 0,0511x^2 + 1,6845x + 58,384.$$

Из таблицы 1 также следует, что при максимальном объемном расходе газов 66,92 м³/час эффективность извлечения диоксида углерода CO_2 в установке будет составлять 89,15 % что достаточно для выполнения рекомендаций международных организаций по снижению выбросов парниковых газов [14].

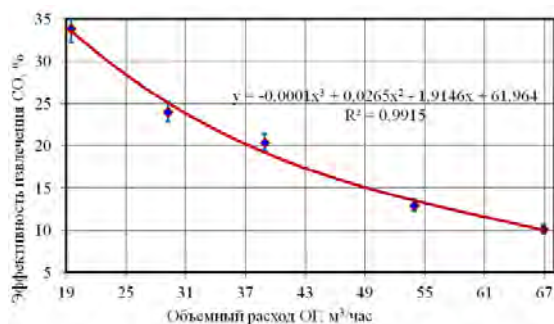


Рис. 4. Эффективность извлечения монооксида углерода в пилотной установке в зависимости от объемного расхода отработавших газов

Из графика на рисунке 4 следует, что минимальное значение эффективности извлечения монооксида углерода из отработавших газов, равное 10,14 % будет иметь место при их объемном расходе 66,92 м³/час, а максимальное – 33,94 % будет при 19,52 м³/час.

Это объясняется низкими кислыми свойствами монооксида углерода (по сравнению с диоксидом углерода). Следовательно, эффективности извлечения монооксида углерода будет сильно зависеть от скорости газов и времени их контакта с адсорбентом.

При объемном расходе 66,92 м³/час скорость отработавших газов в установке будет составлять

14,84 м/с или в 3,4 больше, чем при 19,52 м³/час. Соответственно, и время контакта монооксида углерода с адсорбентом будет в 3,45 раза меньше, что и является следствием значительного снижения эффективности извлечения монооксида углерода из отработавших газов – с 33,94 % до 10,14 %, то есть в 3,35 раза меньше.

Отсюда следует, что эффективности извлечения монооксида углерода из отработавших газов обратно пропорциональна (в пределах погрешности измерительного прибора testo 350) скорости отработавших газов в установке.

Для повышения эффективности извлечения монооксида углерода из отработавших газов двигателя можно использовать предварительное окисление монооксида углерода CO озоном до его диоксида CO_2 , у которого кислые свойства намного более высокие [15].

Зависимость эффективности извлечения CO из отработавших газов двигателя от их объемного расхода определится следующим выражением:

$$y = -1,0 \cdot 10^{-4}x^3 + 0,0265x^2 - 1,9146x + 61,964,$$

где: x – объемный расход газов, м³/час;

y – эффективность извлечения монооксида углерода из отработавших газов в пилотной установке, %.

Заключение

Предложено в качестве адсорбента вредных компонентов продуктов сгорания топлива использовать гранулированную шлаковую пемзу металлургического производства. Высокое значение модуля основности $M > 1$ придает свойство сорбировать на поверхности гранул доменных шлаков обладающие кислыми свойствами вредные вещества (оксиды углерода, азота и серы), присутствующие в потоке газов.

На основании экспериментальных исследований пилотной установки построены графические и получены математические зависимости эффективности извлечения оксидов углерода от объемного расхода отработавших газов. Получено, что минимальное значение эффективности извлечения монооксида углерода, равное 10,14 % будет иметь место при объемном расходе отработавших газов 66,92 м³/час, максимальное – 33,94 % при их расходе 19,52 м³/час. Для диоксида углерода минимальное значение эффективности его извлечения, равное 80,81 % будет иметь место при расходе отработавших газов 19,52 м³/час, а максимальное, равное 89,15 % будет при их расходе 66,92 м³/час.

Литература

1. Weger L.B., Leitao J., Lawrence M.G. Expected impacts on greenhouse gas and air pollutant emissions due to a possible transition towards a hydrogen economy in German road transport. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46, 5875.
2. Modina M.A., Kheker E.V., Voskanian A.A., Pismenskaia Yu.V., Epikhin A.I., Shkoda V.V. Bioindication and biomonitoring assessment of the state of atmospheric air and soil in the study area. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2021, 867, 012072.
3. Modina M.A., Kheker E.V., Epikhin A.I., Voskanyan A.A., Shkoda V.V., Pismenskaya Yu.V. Ways to reduce harmful emissions from the operation of power plants in special environmental control areas. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 867, 012104.

4. Туркин А.В., Туркин В.А. Экспериментальное исследование эффективности очистки выхлопных газов судового двигателя адсорбцией твердым веществом в присутствии озона. Транспортное дело России. 2014. № 1. С. 187-190.
5. Ежов В.С. Об использовании инновационного метода адсорбционной очистки сбросных газов и вентиляционных выбросов. Ресурсосбережение и экология строительных материалов, изделий и конструкций. Курск: Юго-западный государственный университет, 2019. Том 1. С. 147-152.
6. Соловьев А.К., Михеев В.О., Пуликов П.С. Очистка дымовых газов от оксидов серы. Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2014. № 3. С.33-36.
7. Chue K.T., Kim J.N., Yoo Y.J., Cho S.H., Yang R.T. Comparison of activated carbon and zeolite 13X for CO₂ recovery from flue gas by pressure swing adsorption. Ind. Eng. Chem. Res., 1995, 34, 591-598.
8. Ishibashi M., Ota H., Akutsu N., Umeda S., Tajika M., Izumi J., Yasutake A., Kabata T., Kageyama Y.: Technology for removing carbon dioxide from power plant flue gas by the physical adsorption method. Energy Convers. Manag., 1996, 37, 929-933.
9. Kikkinides E.S., Yang R.T., Cho S.H. Concentration and recovery of carbon dioxide from flue gas by pressure swing adsorption. Ind. Eng. Chem. Res., 1993, 32, 2714-2720.
10. Bui M., Adjiman C.S., Bardow A., et al. Carbon capture and storage (CCS): the way forward. Energy Environ. Sci., 2018, 11, 1062-1176.
11. Ahmed I., Jung S.H. Applications of metal-organic frameworks in adsorption/ separation processes via hydrogen bonding interactions. Chem. Eng. J., 2017, 310,197-215.
12. Webley P.A. Adsorption technology for CO₂ separation and capture: a perspective. Adsorption, 2014, 20, 225-231.
13. Integrated device for cleaning exhaust gases of a marine engine: patent 2536749 Russian Federation, IPC F01N 3/08. Published 12/27/2014, Bulletin 36.
14. Ling Zhu. A questionnaire based study on the status quo and future action over the regulation of marine greenhouse gas emissions in Hong Kong. Marine Policy. 2022. № 145. 105278.
15. Ежов В.С. Механизм процессов окисления оксидов азота при синхронной очистке и утилизации газообразных выбросов теплогенерирующих установок. Энергосбережение и водоподготовка. 2008. № 3. С. 48-58.

References

1. Weger L.B., Leitao J., Lawrence M.G. Expected impacts on greenhouse gas and air pollutant emissions due to a possible transition towards a hydrogen economy in German road transport. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46, 5875.
2. Modina M.A., Khekert E.V., Voskanian A.A., Pismenskaia Yu.V., Epikhin A.I., Shkoda V.V. Bioindication and biomonitoring assessment of the state of atmospheric air and soil in the study area. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2021, 867, 012072.
3. Modina M.A., Khekert E.V., Epikhin A.I., Voskanyan A.A., Shkoda V.V., Pismenskaya Yu.V. Ways to reduce harmful emissions from the operation of power plants in special environmental control areas. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 867, 012104.
4. Turkin A.V., Turkin V. A. Experimental study of the efficiency of purification of marine engine exhaust gases by solid adsorption in the presence of ozone. Transport business in Russia, 2014, 1, 187-190.
5. Ezhov V.S. On the use of an innovative method of adsorption purification of waste gases and ventilation emissions. Resource conservation and ecology of building materials, products and structures. Kursk: Southwestern State University, 2019, 1, 147-152.
6. Soloviev A.K., Mikheev V.O., Pulikov P.S. Purification of flue gases from sulfur oxides. Bulletin of the Siberian State Industrial University, 2014, 3, 33-36.
7. Chue K.T., Kim J.N., Yoo Y.J., Cho S.H., Yang R.T. Comparison of activated carbon and zeolite 13X for CO₂ recovery from flue gas by pressure swing adsorption. Ind. Eng. Chem. Res., 1995, 34, 591-598.
8. Ishibashi M., Ota H., Akutsu N., Umeda S., Tajika M., Izumi J., Yasutake A., Kabata T., Kageyama Y.: Technology for removing carbon dioxide from power plant flue gas by the physical adsorption method. Energy Convers. Manag., 1996, 37, 929-933.
9. Kikkinides E.S., Yang R.T., Cho S.H. Concentration and recovery of carbon dioxide from flue gas by pressure swing adsorption. Ind. Eng. Chem. Res., 1993, 32, 2714-2720.
10. Bui M., Adjiman C.S., Bardow A., et al. Carbon capture and storage (CCS): the way forward. Energy Environ. Sci., 2018, 11, 1062-1176.
11. Ahmed I., Jung S.H. Applications of metal-organic frameworks in adsorption/ separation processes via hydrogen bonding interactions. Chem. Eng. J., 2017, 310,197-215.
12. Webley P.A. Adsorption technology for CO₂ separation and capture: a perspective. Adsorption, 2014, 20, 225-231.
13. Integrated device for cleaning exhaust gases of a marine engine: patent 2536749 Russian Federation, IPC F01N 3/08. Published 12/27/2014, Bulletin 36.
14. Ling Zhu. A questionnaire based study on the status quo and future action over the regulation of marine greenhouse gas emissions in Hong Kong. Marine Policy. 2022. № 145. 105278.
15. Ezhov V.S. Mechanism of oxidation processes of nitrogen oxides during synchronous cleaning and utilization of gaseous emissions from heat-generating installations. Energy saving and water treatment, 2008, 3, 48-58.

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

Туркин Владимир Антонович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Новороссийск, пр-т. Ленина, 93, e-mail: turvla@mail.ru

Vladimir A. Turkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Operation of Ship Mechanical Installations, Admiral Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk, 353924, Russian Federation, e-mail: turvla@mail.ru

Игнатенко Георгий Владимирович, старший преподаватель кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр-т. Ленина, 93, e-mail: ignatencko.georg@yandex.ru

George V. Ignatenko, senior lecturer of the department of Operation of ship mechanical installations Admiral Ushakov Maritime State University Lenin Avenue, 93, Novorossiysk, 353924, Krasnodar region, Russian Federation, e-mail: ignatencko.georg@yandex.ru

Беляев Владимир Владимирович, аспирант кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр-т. Ленина, 93, e-mail: bv80@yandex.ru

Vladimir V. Belyaev, Graduate student of the department of Operation of ship mechanical installations Admiral Ushakov Maritime State University Lenin Avenue, 93, Novorossiysk, 353924, Krasnodar region, Russian Federation, e-mail: bv80@yandex.ru

Зубко Сергей Сергеевич, аспирант кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр-т. Ленина, 93, e-mail: 1992sergeyz@mail.ru

Sergey S. Zubko, Graduate student of the department of Operation of ship mechanical installations Admiral Ushakov Maritime State University Lenin Avenue, 93, Novorossiysk, 353924, Krasnodar region, Russian Federation, e-mail: 1992sergeyz@mail.ru

Краевой Алексей Игоревич, аспирант кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр-т. Ленина, 93, e-mail: kraevoy03@mail.ru

Aleksey I. Kraevoy, Graduate student of the department of Operation of ship mechanical installations Admiral Ushakov Maritime State University Lenin Avenue, 93, Novorossiysk, 353924, Krasnodar region, Russian Federation, e-mail: kraevoy03@mail.r

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 16.01.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.02.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 22.02.2024.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING

Научная статья

УДК 656.61.052: 629.123: 004.021

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.020>

Анализ информации судовой системы автоматической идентификации и моделей для построения пространственно-временных алгоритмов прогнозирования движения судов в море

Астреин В.В.¹ Astrein-vadim@rambler.ru, Кондратьев С.И.¹ zur_mga@nsma.ru,
Боран-Кешишьян А.Л.¹ zur_mga@nsma.ru, Астреина Л.Б.¹ astreina-ludmila@gmail.com,
Филатов В.И.¹ Filatov_viktor1994@mail.ru

¹Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. Точность решения задач безопасности судоходства определяется двумя факторами: точностью исходных данных и степенью адекватности используемых математических моделей. Судовая система автоматической идентификации (АИС) имеет явные преимущества перед РЛС/САРП по точности данных для прогнозирования движения судов. Эти данные могут быть использованы при построении Систем поддержки принятия решений в Морских автономных судах (МАНС) для отслеживания маршрута движения и прогнозирования столкновений в режиме реального времени. Данные АИС позволяют описать движение в координатном форме, в виде одномерного временного ряда наблюдений места судна (x, y) , выявить тенденции изменения динамики движения (рост, снижение или постоянство) и наблюдать череду периодов движения судна с разной динамикой, когда стационарные временные ряды переходят в нестационарные и наоборот. Смена режимов движения сопровождается разладкой временных рядов, т.е. обнаружения изменения свойств наблюдаемого параметрического ряда, происходящего в неизвестный заранее момент времени. Определение момента разладки из-за инерционности судна довольно сложная задача. Для ее решения может быть использован метод нахождения отношения правдоподобия порогового значения некоторого решающего правила после пересечения соответствующих значений временных рядов (x, y) . Универсального метода прогнозирования временных рядов не существует, каждый метод находит свое применение для разных видов движения и разных типов временных рядов. Временные ряды (x, y) могут быть использованы в различных моделях: физических, на основе машинного обучения и гибридных моделях. Сегодня не существует реализации той или иной модели в режиме реального времени. Эта проблема может быть решена путем разработки гибридных моделей, которые представляют собой комбинацию пространственно-временных алгоритмов прогнозирования движения судов в море для получения лучших результатов оценки движения судна.

Ключевые слова: автономное судоходство, Система автоматической идентификации, мониторинг и прогнозирование движения судна в режиме реального времени, предварительный анализ данных АИС, модели движения судна

Для цитирования: 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

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.020>

Analysis of The ship's automatic identification system information and models for constructing spatio-temporal algorithms for predicting vessel traffic

Vadim V. Astrein¹ Astrein-vadim@rambler.ru, Sergey I. Kondratiev¹ zur_mga@nsma.ru, Anastas L. Boran-Keshishian¹ zur_mga@nsma.ru, Ludmila B. Astreina¹ astreina-ludmila@gmail.com, Viktor I. Filatov¹ Filatov_viktor1994@mail.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. The accuracy of solving navigation safety problems is determined by two factors: the accuracy of the initial data and the degree of adequacy of the mathematical models used. The ship's automatic identification system (AIS) has clear advantages over radar/ARPA in terms of data accuracy for predicting vessel movements. This data can be used to build Decision Support Systems for Maritime Autonomous Vessels (MANS) to track traffic routes and predict collisions in real time. AIS data makes it possible to describe movement in coordinate form, in the form of a one-dimensional time series of observations of the vessel's location (x, y) , identify trends in changes in movement dynamics (increase, decrease or constancy) and observe a series of periods of ship movement with different dynamics, when stationary time series change to non-stationary and vice versa. A change in movement modes is accompanied by a

disorder in the time series, i.e. detection of changes in the properties of the observed parametric series occurring at an unknown point in time. Determining the moment of disorder due to the inertia of the vessel is a rather difficult task. To solve it, the method of finding the likelihood ratio of the threshold value of some decision rule after crossing the corresponding values of the time series (x,y) can be used. There is no universal method for forecasting time series; each method finds its application for different types of movement and different types of time series. Time series (x,y) can be used in various models: physical, machine learning and hybrid models. Today there is no implementation of this or that model in real time. This problem can be solved by developing hybrid models, which are a combination of spatio-temporal algorithms for predicting the movement of vessels at sea to obtain better vessel movement estimation results.

Keywords: autonomous navigation, automatic identification system, real-time monitoring and forecasting of vessel movement, preliminary analysis of AIS data, vessel movement models.

For citation: 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

Введение

В последние десятилетия актуальной темой является создание автономных судов (МАНС) с различным уровнем автономности [1]. Независимо от уровня автономности, основой безопасного плавания таких судов являются интеллектуальные Системы поддержки принятия решений (СППР), предназначенные для решения задач безопасного движения МАНС в любых обстоятельствах и условиях плавания.

Точность решения этих задач, а также возможность использования полученных результатов в практике обеспечения безопасности судовождения, определяются двумя факторами: точностью исходных данных и степенью адекватности используемых математических моделей. Важнейшие исходные данные для задач планирования безопасного движения и расхождения судов – это прогноз движения всех судов, распределенных в некотором географическом водном пространстве. Недостаточное знание процессов движения судов, влияние на них огромного числа неконтролируемых и неуправляемых факторов приводят к тому, что эти процессы являются случайными, которые могут носить как стационарный, так и нестационарный характер. Кроме того, они подвержены влиянию внутренних и внешних факторов, изменяющих их стохастическую структуру.

Благодаря наличию высокоточных систем определения места судна (СНС) и передачи этих данных всем пользователям с помощью Автоматической идентификационной системы (АИС), имеется возможность точного слежения и определения параметров судов-целей, а, следовательно, повышения эффективности расхождения и управления судами в режиме реального времени. Несмотря на привлекательность использования информации АИС для слежения и прогнозирования движения судов, до сих пор не создано эффективных алгоритмов, которые могли бы обрабатывать информацию АИС в режиме реального времени. Поэтому целью данной статьи является анализ информации АИС и моделей для построения пространственно-временных алгоритмов слежения и прогнозирования движения судов в море.

Данные АИС и выделение ключевых параметров

Решение задач безопасного плавания и предупреждения столкновений судов должны рассматриваться в локальной системе навигации МАНС в режиме реального времени. Чем сложнее

навигационные условия, тем короче должен быть такт реального времени, т. е. меньшее допустимое запаздывание навигационной информации. Поэтому достоинство любого навигационного метода определяют три главных характеристики: точность определения текущих координат судна, продолжительность навигационного определения (время, затраченное на получение координат) и дискретность определений (промежуток времени между последовательными определениями координат).

На борту современных судов установлены сложные системы, позволяющие вести мониторинг и прогнозировать движение множества судов в реальном времени с целью обеспечения судоводителя непрерывной информацией о положении и параметрах судов (АИС и РЛС/САРП). Сравнительный функциональный анализ АИС и РЛС/САРП детально анализируются в [2]. Исходя из этого анализа, можно уверенно сказать, что приоритет АИС перед РЛС/САРП для использования в качестве основного инструмента мониторинга и прогнозирования движения судов очевиден. Ключевыми преимуществами АИС перед РЛС/САРП являются: возможности осуществления обмена информацией между всеми судами, выработки совместного плана действий и его согласования между всеми судами, т.е. существуют системные признаки, которые можно рассматривать в качестве основы для создания СППР с функциями автоматического мониторинга и прогнозирования движения судов.

Хотя перечисленные преимущества являются очень привлекательными для разработки систем автоматического мониторинга и прогнозирования в режиме реального времени, однако имеется ряд трудностей в обработке информации АИС.

Основным для транспондера АИС является «автономный, непрерывный» режим работы. Судовая аппаратура АИС в этом случае передает на двух УКВ частотах блоки информации с короткими временными интервалами. Автономный (независимый) режим работы используется как в открытом море, так и «по умолчанию» в прибрежных районах. Передача динамической информации и ее содержание судовыми станциями осуществляется с интервалами, указанными в таблицах 1 и 2.

Динамическая информация передается в зависимости от скорости судна и изменения его курса. Интервал передач задается в соответствии с таблицей 2 «Сообщение о местоположении». По таблице 2 последовательность наблюдений за судами будет складываться во времени сразу из

нескольких величин, получаемых АИС. Хотя АИС и предназначена для целей предупреждения столкновений судов, однако она не рассчитывает параметры сближения ($D_{кр}$, $T_{кр}$) и не определяет «опасность столкновения». Тем не менее существенных результатов в автоматическом мониторинге и прогнозировании движения судна-цели и опасности столкновения по надежности, точности, скорости вычислений можно достигнуть при изучении наблюдаемых обсерваций цели ($\varphi_{ц}$, $\lambda_{ц}$) в соответствии с периодом передачи информации станцией АИС (табл. 1).

Таблица 1

Интервал передач динамической информации

Динамическое состояние судна	Интервал между сообщениями
Судно на якоре, на швартовых	3 мин
Судно на якоре, на швартовых или движущееся быстрее 3 узлов	10 сек
Судно на ходу (0-14 узлов)	10 сек
Судно на ходу (0-14 узла) и изменение курса	3 сек
Судно на ходу (14-23 узла)	6 сек
Судно на ходу (14-23 узла) и изменение курса	2 сек
Судно на ходу (более 23 узлов)	2 сек
Судно на ходу (более 23 узлов) и изменение курса	2 сек

Таблица 2

Содержание динамической информации

Вид и содержание информации	Особенности информации
Координаты судна	Автоматически считываются с датчика местоположения
Время определения координат	Время по шкале UTC. Автоматически считывается с датчика местоположения
Путевой угол, путевая скорость	Автоматически считывается с датчика местоположения. (COG – Course over ground / SOG – Speed over ground)
Курс	Автоматически считывается с судового курсоуказателя (гироскопа)
Угловая скорость	Скорость поворота судна

Контрольные участки (периоды) приема динамической информации покажем в таблице 3. Динамика во времени ($\varphi_{ц}$, $\lambda_{ц}$) судна-цели получаемых по АИС (табл. 3) представляется с разным шагом дискретизации (Δt), а это создаёт существенную проблему при обработке информации. Частота передачи информации СНС фиксирована (каждую 1 с.), а передача информации АИС изменяется в зависимости от скорости/курса судна (см. табл. 3). Повышение интенсивности передач происходит при изменении курса судна. Изменение курса определяется путем подсчета величины курса судна за предыдущие 30 с. и сравнением его с текущим. Если разница превышает 5 град., то для передач выбирается формат ITDMA (множественный доступ с временным разделением) с обновлением каждые 3 с. между передачами. Повышенная интенсивность обеспечивается до тех пор, пока разница между расчетным и текущим значениями будет больше 5 град. в течение 20 с. Если судно не меняет свой режим движения и продолжает передавать регулярные сообщения с неизменным периодом повторения, то далее используется протокол SOTDMA (самоорганизующаяся линия передачи данных с разделением времени и множественным доступом) [3]. Процесс пересылки данных, когда судно меняет курс представляется следующим образом: станция кратковременно переходит на протокол ITDMA, т.е. обозначает слоты неповторимого характера, а затем возвращается к SOTDMA (к основной схеме доступа) с новым периодом повторения для продолжительной работы.

Следует заметить, что при необходимости представители компетентной власти в районе действия СУДС могут переключить бортовую аппаратуру АИС с «автономного режима» на «назначенный» режим или режим «по запросу» [4, 5]:

Таблица 3

Контрольные участки (периоды) приема динамической информации АИС и ГНСС

Источник информации	Время (с)										
	Скорость судна (уз)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
АИС	>3										*
	< 14										*
	<14 (К)			*			*			*	
	14-23						*				
	14-23 (К)		*		*		*		*		*
	> 23		*		*		*		*		*
	> 23 (К)		*		*		*		*		*
ГНСС	-	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

- «назначенный» режим – при котором интервал передачи данных различных блоков информации судовой АИС устанавливается дистанционно с берега;
- режим «по запросу» – когда данные передаются судовой АИС только в ответ на запрос с берега или от другого судна.

Таким образом, при получении динамической информации АИС временной ряд о движении судна-цели будет неполным (с не равноотстоящими уровнями по времени). В целом наблюдение за движением судна-цели по АИС можно описать криволинейным равномерным движением на случайных кусочно- интервальных отрезках времени (рис. 1), протекающих приблизительно однородно или неоднородно и имеющих вид непрерывных случайных колебаний курса и скорости ($K_{ц}$, $V_{ц}$) вокруг некоторого значения заданного локсодромического курса ($K_{ц}$). Движение судна-цели можно описать неравномерным криволинейным движением при активном наборе скорости или торможении. Изменение скорости судна-цели влечет и изменение шага дискретизации Δt (табл. 3), то есть моментов времени получения информации о ($\varphi_{ц}$, $\lambda_{ц}$) (рис. 1-4).

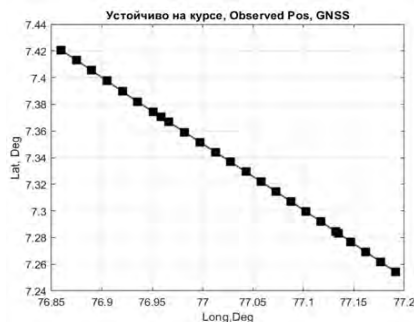


Рис. 1. Изменение скорости и изменение Δt

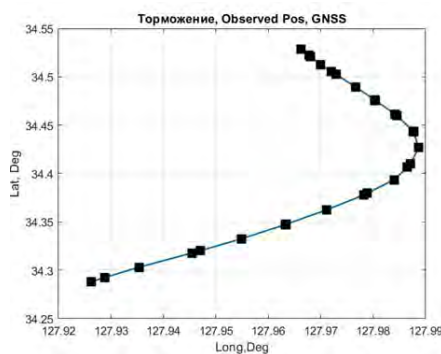


Рис. 2. Торможение и изменение шага Δt

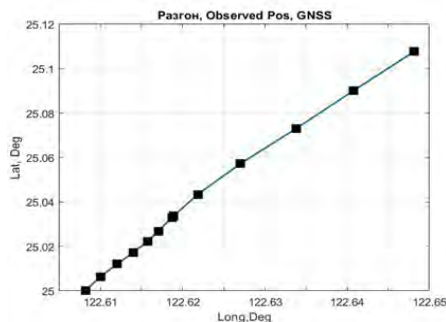


Рис. 3. Разгон и изменение шага Δt

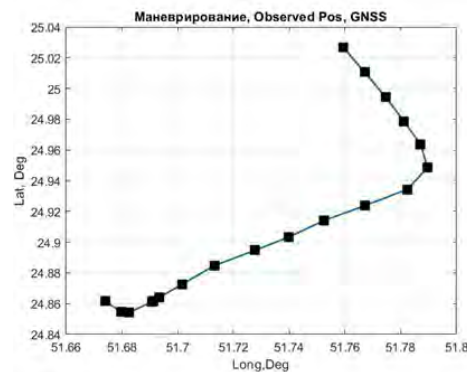


Рис. 4. Маневрирование и изменение Δt

Предварительный анализ информации АИС

Целью анализа информации АИС является выявление закономерностей для решения задач мониторинга и прогнозирования движения судна. По количеству анализируемые динамические характеристики являются многомерными (см. табл. 2) (рассматриваются несколько характеристик мониторинга и прогнозирования). Однако определить положение судна и спрогнозировать его движение можно и двумя отдельно взятыми уравнениями движения в координатном виде:

$$\varphi = \varphi(t), \lambda = \lambda(t) \quad (1)$$

Уравнения (1) представляют собой координатный способ задания движения точки. Используя терминологию и обозначения теории временных рядов, можно переписать многомерный ряд (1) в виде последовательности наблюдений определения места судна ($\varphi_1, \dots, \varphi_i, \dots, \varphi_n; \lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n;$) в виде одномерного ряда обсерваций места судна:

$$y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_i), \dots, y(t_n) \quad (2)$$

взятых в моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n$. Последовательность (2) представляет собой временные ряды (ВР), то есть упорядоченную во времени последовательность обсерваций судна.

Задача прогноза по ВР имеет целью по данным наблюдений обсерваций - предсказать будущие значения измеряемых характеристик движения судна, т.е. составить прогноз на некоторый горизонт (D), т.е. задача прогнозирования по ВР заключается в нахождении функции (F):

$$y_{n+d} = F(y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_i), \dots, y(t_n), d) \quad (3)$$

где $d \in \{1, 2, \dots, D\}$ – отсрочка прогноза, (D) – горизонт прогнозирования.

Как было показано выше (см. табл. 2), информация о движении судна может быть получена по наблюдениям ВР АИС. Эти наблюдения описывают различные типы движений, как линейного, так и нелинейного характера (см. рис. 1 - 4).

ВР АИС, описывающие тенденции движения судна, могут быть стационарными и нестационарными.

Стационарным считается ВР, если свойства ряда не меняются при изменении начала отсчета. ВР $y(t)$ является стационарным в широком смысле, если математическое ожидание, дисперсия не зависят от t :

$$\begin{aligned} E(y_t) &= \text{const} \\ \text{Cov}(y_t, y_{t-k}) &= \gamma_k. \end{aligned} \quad (4)$$

Например, на рисунке 1 стационарными являются лишь кусочки траектории, где выполняются все требования (4), т.е. это - прямолинейное равномерное движение судна по заданной локсодромической траектории (K_3) с сохранением заданной скорости (V_k).

Если статистические свойства ВР меняются со временем, то ВР является нестационарным. Рассматривая рисунки 2 и 3 (разгон/торможение), видна тенденция (тренд) увеличения/уменьшения динамики движения судна (скорости). А на рисунке 4 показано изменение курса судна (K_3) с целью избежания опасности (циркуляция). Такое движение судна характеризуется вращательным движением в следствие заданной перекладки пера руля (α), быстротой и направлением вращения угловой скорости (ω). В этом случае ВР принято считать нестационарными временными рядами, т.е. ряды подверженные изменениям во времени с детерминированным трендом.

Как видно из рисунков 1 - 4 движение судна представляют собой череду периодов с разной динамикой: стационарные ряды переходят в нестационарные и наоборот. Таким образом, движение как своего судна и судна-цели характеризуется тенденциями изменения уровней (рост, снижение или постоянство) и отклонением (колебаний), а обобщенную модель движения можно представить в виде системы независимых уравнений (временных рядов) на множестве неравнозначных интервалах времени $[\Delta t_i]$, состоящих из последовательности следующими друг за другом отрезков кривых, где каждая зависимая переменная (Y_i) может рассматриваться как функция (f) одного набора регрессоров (y_i):

$$\begin{cases} Y_{1\Delta t_1} = f_{\Delta t_1}(y_{1\Delta t_1}) + \varepsilon_{1\Delta t_1}, \\ Y_{2\Delta t_2} = f_{\Delta t_2}(y_{2\Delta t_2}) + \varepsilon_{2\Delta t_2}, \\ \dots, \\ Y_{i\Delta t_i} = f_{\Delta t_i}(y_{i\Delta t_i}) + \varepsilon_{i\Delta t_i}, \\ \dots, \\ Y_{n\Delta t_n} = f_{\Delta t_n}(y_{n\Delta t_n}) + \varepsilon_{n\Delta t_n}. \end{cases} \quad (5)$$

Сегментация и разладка

Выделение периодов по формуле (5) является очень важной задачей при анализе ВР АИС. Эта задача при обработке ВР движения судна-цели называется сегментацией. При этом разделяют задачи априорной и апостериорной сегментации [7]. Под априорной сегментацией понимают задачу прогноза момента разладки, т.е. обнаружение резкого изменения свойств наблюдаемого параметрического ряда, происходящего в неизвестный заранее момент времени. Под апостериорной сегментацией понимают задачу разделения имеющегося временного ряда на сегменты с разной динамикой.

Для оценивания элементов движения судна-цели on-line охарактеризуем движение судна в дискретном времени Δ_t упрощенно – с точки зрения кинематики – пятью параметрами, образующими вектор s_k : двумя координатами (x, y) , двумя проекциями вектора

скорости на оси координат (v_x, v_y) и угловой скоростью движения (ω):

$$\mathbf{s}_k = (x, y, v_x, v_y, \omega)_{k}^{\Delta t}, \quad (6)$$

Модель (6) включает угловую скорость ω и потому пригодна для анализа как линейных ($\omega \sim 0$), так и нелинейных ($\omega \neq 0$) траекторий судна.

Рассмотрим возможные типовые модели движения судна.

Первая модель движения по заданной локсодромической траектории с постоянной скоростью заключается в удержании судна на заданном курсе

(K_3). В зависимости от гидромет условий возможны кладки руля до 5-10 градусов ($\Delta K_3 = 0 \div 10^\circ$) левого/правого борта, при этом $\omega \sim 0$; $v \sim const$, $K_3 \sim const$. Другими словами, судно движется по сложной траектории в квазистационарном режиме, а траектория описывается стационарными ВР АИС (x, y).

Вторая модель – модель маневрирования курсом судна на циркуляции ($K_{\text{ц}}$). Она описывается нестационарными ВР АИС (x, y), имеет нелинейный характер движения, сопровождающийся большими кладками руля более 10 градусов ($\Delta K_{\text{ц}} > 10^\circ$), при этом $\omega = f(t)$, $v = f(t)$ и $K_{\text{ц}} = f(t)$.

Третья модель - разгон судна, т.е. достижение судном установившейся скорости движения, характеризуется $\omega \sim 0$; $K_3 \sim const$, $v = f(t)$ и нестационарными ВР АИС (x, y) .

Четвертая модель – торможение – процесс остановки судна посредством реверса движителей в режим «Полный задний ход», она характеризуется $\omega \rightarrow 0$; $K_3 \rightarrow const$, $v = f(t)$ и нестационарными ВР АИС (x, y) .

Если количество моделей движения нам хорошо известно заранее (режим прямолинейного равномерного движения, циркуляция правого/левого борта, разгон и торможение), то исследуемые модели движения судна можно отнести к классу задач многомодельного слежения. Многомодельный подход, предполагает, что каждый режим движения описывается одной моделью из конечного множества моделей. Известные алгоритмы многомодельного оценивания не требуют принятия решений, то есть они не обнаруживают режим движения, а требуют вычисления всех оценок для каждой возможной модели по всей траектории в каждый момент времени. Для получения оптимальных оценок, позволяющих отслеживать и прогнозировать движение судна, необходимо быстро обнаруживать изменения в режиме движения.

Однако из-за инерционности движения судна определить момент перехода с линейного на нелинейное движение в режиме реального времени по ВР АИС (x, y) затруднительно. Покажем это на примере смены модели движения с равномерного прямолинейного движения на движение судна на циркуляции (рис.5).

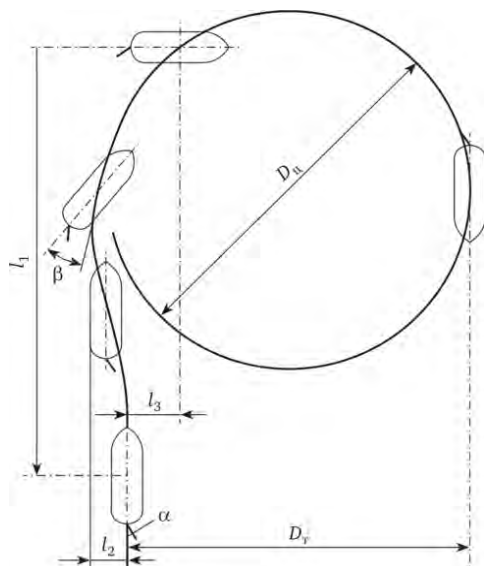


Рис. 5. К определению момента разладки на циркуляции судна

За начало циркуляции принимается момент (t_k) начала перекладки руля α . В маневренный период циркуляции на участке выдвига (l_1) траектория движения ЦТ судна из прямолинейной превращается в криволинейную с центром кривизны со стороны борта, противоположного стороне кладки руля α (рис.5.). Однако этот момент по ВР АИС (x, y) не определяется как разладка. ВР (x, y) имеет псевдолинейный характер движения ЦТ судна даже при кладке руля $\alpha = 35$ градусов практически в течение всего маневренного периода циркуляции.

По ВР АИС (x, y) судно еще никак не поменяло свое поведение, но уже произошло «событие» [8], которое в ближайшем будущем повлияет на траекторию его движения. Линейная скорость судна $v \sim const$ в этот период также сильно не изменяется. Единственным индикатором разладки или смены модели является резкое изменение угловой скорости ω с момента перекладки руля t_k (рис. 6) в период разгона [9].

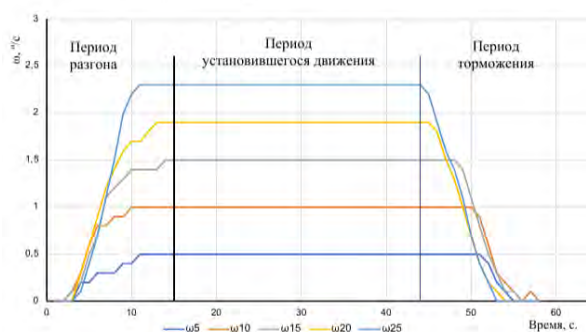


Рис. 6 Зависимость ω от кладки руля

Анализ показывает, что сложности возникают и при определении момента разладки t_k при переходе с модели равномерного прямолинейного движения на модель разгон или торможение. Они характеризуются изменением скорости судна $v = f(t)$; $\omega \sim 0/\omega \rightarrow 0$; $K_3 \rightarrow const$. Однако в начальные периоды разгона или торможения $v \sim const/v = 0$ явных индикаторов для смены модели нет.

Возникает задача поиска момента разладки t_k и смены модели по наблюдениям (x, y) соответствующих значений нестационарных ВР АИС.

Момент разладки можно определить по периодичности сообщений АИС. Сообщения об изменении курса и скорости передаются с минимальной задержкой (см. табл. 3). Индикатором разладки в этом случае является переход на новый интервал сообщений Δt в соответствии с алгоритмом периодичности передачи сообщений, описанным выше. Информацию об изменении курса судна довольно точно можно получить при изменении Δt . Однако изменение скорости при прямолинейном движении судна по периодичности сообщений АИС получить невозможно.

Смену характера движения судна можно обнаружить методом нахождения отношения правдоподобия порогового значения некоторого решающего правила после пересечения соответствующих значений нестационарных ВР АИС (x, y). Для решения такой задачи можно использовать последовательный критерий Вальда. Рассмотрим две гипотезы: основная H_0 и альтернативная H_1 , соответствующие двум различным режимам движения. 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_k неизвестен. Метод с использованием последовательного критерия Вальда заключается в вычислении логарифмической функции отношения правдоподобия λ_k и сравнением ее значений с верхним $A = \ln((1 - \theta)/\varepsilon)$ и нижним $B = \ln(\theta/(1 - \varepsilon))$ порогами решающего правила, где ε и θ – вероятности ошибок первого и второго рода. Последовательное решающее правило для различия двух гипотез запишем в виде:

$$\begin{cases} \text{Если } \lambda_k \geq A, \text{ тест завершают выбором } H_1, \\ \text{Если } \lambda_k \leq B, \text{ тест завершают выбором } H_0, \\ \text{Если } A > \lambda_k > B, \text{ наблюден. продолжают.} \end{cases} \quad (7)$$

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.

Модели временных рядов

В настоящее время существует два качественно различных подхода к исследованию ВР: статистический и динамический. Ряд успешных подходов, имеющих практическое применение считаются «классическими». Статистический метод формулируется следующим образом: если имеется ряд (y_n) и шум (ε_i) — последовательность не коррелирующих и одинаково распределенных случайных величин с нулевым средним, тогда можно записать:

$$y_n = F(y_{n-1}, \dots, y_{n-m}, \varepsilon_n, \dots, \varepsilon_{n-k}) \quad (8)$$

где k и m - некоторые конечные числа.

Авторегрессионные модели (AR-модели) используют прошлые значения ряда для прогнозирования его будущих значений. Эта модель предполагает, что текущее значение ряда зависит от его предыдущих значений. Наиболее популярной AR-моделью является модель первого порядка (AR (1)), которая предполагает, что текущее значение ряда зависит только от его предыдущего значения. Основной моделью статистических методов является модель типа ARMA (Auto Regression Moving Average — авторегрессия скользящего среднего):

$$y_i = a_0 + \sum_{j=1}^m a_j y_{i-j} + \sum_{j=0}^k b_j \varepsilon_{i-j} \quad (9)$$

Нахождение искомых коэффициентов — это возможное решение задачи идентификации, а само соотношение для y_i можно использовать для прогноза по m предыдущим. В качестве прогнозируемой величины обычно используют среднее значение:

$$\hat{y}_i = a_0 + \sum_{j=1}^m a_j y_{i-j}, \quad (10)$$

а предшествующие значения известны точно.

К статистическим моделям относят статистические алгоритмы (GARCH, модель Хольта / Винтерса и т.д.), модель линейной регрессии, нейронные сети различных архитектур (RNN, LSTM и т.д.) [10]. Эти подходы хорошо описаны, всесторонне исследованы, и нашли широкое применение.

Для решения задач прогнозирования, если ВР нестационарные, необходимо нестационарный ВР привести к стационарному при помощи разностного оператора [11] удалением тренда (или «взятием разности»). Основная модель прогнозирования нестационарных ВР - ARIMA, комбинирующая авторегрессионные и скользящие средние модели. ARIMA включает три параметра: параметр авторегрессии (p), параметр скользящего среднего (q) и параметр интегрирования (d).

Для обнаружения аномалий обычно используют такие алгоритмы машинного обучения, как KMeans, KNN, OPTICS [12].

Прогнозирование движения судна подразумевает грамотный и качественный анализ данных, на основе которых строится прогноз. Представленный анализ информации АИС показывает, что для описания движения судна в режиме реального времени не существует универсального метода прогнозирования временных рядов, каждый метод находит свое применение для разных видов движения и разных типов временных рядов.

Модели движения судна

Оценка безопасного движения судна подразумевает создание модели, которая фиксирует параметры движения, оценивает его будущее положение и траекторию на основе математической модели движения. Тенденции движения судна, как было показано выше, описываются кинематическими («геометрия движения») и динамическими («движущие силы») параметрами. Движение судна — это кинематические типы движений, такие как прямолинейное, криволинейное, равномерное, неравномерное и т. д., динамические типы — это инерционные типы движений торможение, разгон.

Методы моделирования и прогнозирования траектории судна можно разделить по механизму их

реализации на три класса: методы, основанные на физических моделях, методы на основе машинного обучения и гибридные методы.

Физические модели

Физические модели описывают движение судна с помощью группы математических уравнений, которые точно учитывают все возможные влияющие факторы (массу, силу, инерцию, скорость рыскания и т. д.) и рассчитывают характеристики движения с использованием физических законов. В общем случае математическая модель движения судна как управляемая динамическая система $S(t)$, предложенная, например, в работе [13], может быть представлена следующим образом:

$$S(t) = F(t, C, S(0), U(t), L(t), E(t)), \quad (11)$$

где F — оператор, характеризующий конкретную математическую модель; C — вектор постоянных параметров судна, которые характеризуют конкретное моделируемое судно; $S(0)$ — совокупность переменных параметров, описывающих состояние судна в начальный момент; $S(t)$ — совокупность переменных параметров, описывающих состояние судна в момент времени t ; $U(t)$ — управляющие воздействия на систему в разные моменты времени; $L(t)$ — функция нагрузки на систему, в данном случае распределение всех грузов на судне; $E(t)$ — функция внешних возмущающих воздействий на систему.

Если каждый фактор включен в уравнение моделирования, то построенная удачная физическая модель может прогнозировать точную траекторию движения судна.

Существует множество динамических моделей судов. Покажем модель, предложенную в [14, 15]. Она особенно интересна, поскольку включает меньше переменных, но при этом более широко применима к различным типам судов:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \sin(\phi - \beta) \\ \dot{y} = v \cos(\phi - \beta) \\ \dot{\phi} = K\Omega \\ \dot{\Omega} = -\frac{v_0^2}{2pL^2} \left[\frac{qL}{v_0} \Omega + s_{32} \delta \right] \\ \dot{\beta} = -\frac{v_0}{2pL} [q\beta + s_{21} \delta] \\ v = Kv_0 \\ K = \left(1 + \frac{1,9\Omega^2 L^2}{v_0^2} \right)^{-1} \end{cases} \quad (12)$$

Здесь (x, y) , ϕ , β , δ — положение, курс, скорость вектора поворота, угол сноса и отклонение угла пера руля соответственно; $v = v(\Omega)$ и $v_0 = v(0)$ — скорости судна при скорости разворота Ω и $\Omega = 0$ (т.е. в начале разворота) соответственно; гидродинамические константы p , q , s_{21} , s_{31} зависят от геометрии и размеров судна, в частности, от длины судна L . Эта модель использовалась для слежения за судном и для прогнозирования его положения в [16].

Преимущество физических моделей заключается в том, что их можно использовать для точного прогнозирования траектории судна. Однако проблема физических моделей заключается в том, что если параметры модели конкретного судна могут быть определены с высокой точностью, то для другого судна эти параметры отличаются и не могут быть применены. Физические модели редко

используются для прогнозирования траектории движения судна, поскольку такие модели нуждаются в детализации параметров среды и состояния судна. Исчерпывающий анализ положительных и отрицательных качеств физических моделей дан, например, в [13].

Методы машинного обучения

В основе второго класса методов лежат *методы машинного обучения* [17-19], моделирующие движение судна на основе данных о движении, например, доступные на АИС/СНС. Такие методы позволяют учитывать все возможные факторы влияющие на траекторию движения судна в неявном виде.

Уравнения (1) представляют собой, как отмечалось выше, координатный способ задания движения точки. Сложность работы с обработкой информации (1) была показана выше при описании ВР получаемых с помощью АИС (неточность, противоречивость, разнородность, неполнота данных, значительные объемы). Для их обработки требуются специальные программные средства: инструменты преобразования «сырых» данных в информацию, а информацию в знания. Для решения задач прогнозирования движения судна могут использоваться различные *алгоритмы машинного обучения*.

Так в [20-26] предлагается использовать *методы нейронных сетей*. Преимущество нейронных сетей заключается в том, что это универсальный метод, который изучен во многих областях показывающий хорошую производительность и стабильность моделей. Кроме того, метод не требует никаких предположений/предварительной информации, например, о судне и о погоде. Недостатком является то, что процесс обучения обычно очень медленно сходится и не существует общих правил выбора функции активации и скрытого слоя, поэтому архитектуру сети необходимо определять эмпирически в соответствии с задачами слежения и прогнозирования.

В [27, 28] предложен метод анализа второстепенных компонент (МСА). Метод оказался хорошим алгоритмом оценки движения судна. Он имеет аналогичную математику, что и анализ главных компонент (РСА) [7], за исключением того, что МСА использует собственные векторы, соответствующие второстепенным компонентам (собственным значениям). Преимуществом этого метода является его простота, т. е. его легко понять и реализовать. Но его возможности для моделирования нелинейного движения могут быть ограничены, поскольку анализ компонент (например, РСА) представляет собой линейное преобразование и не применим к работе с нелинейными распределенными данными.

В [29,30] предложен (расширенный) метод фильтрации Калмана. Фильтр Калмана использует модель динамики системы (физические законы движения), известные управляющие входные данные для этой системы и множественные последовательные измерения (данные от датчиков) для формирования оценки переменных величин состояния судна. Чтобы использовать фильтр Калмана для оценки движения судна, необходимо определить модель системы и модель измерения:

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_{k-1}, \quad (13)$$

$$z_k = h(x_k) + v_k. \quad (14)$$

где x_k , u_k и z_k — состояние системы, вход управления и измерение соответственно. Например, x = (широта, долгота, скорость, курс, ускорение) и z = (широта, долгота). w_{k-1} и v_k — это шумы процесса и наблюдения, которые считаются многомерными гауссовыми шумами с нулевым средним значением. Фильтр Калмана представляет собой рекурсивную систему оценки, которая состоит из двух вычислительных фаз: фазы прогнозирования и фазы обновления. Фаза прогнозирования использует состояние предыдущего временного шага для получения оценки состояния на текущем временном шаге. На этапе обновления текущий прогноз объединяется с информацией о текущих наблюдениях для уточнения оценки состояния судна. Точность краткосрочного прогнозирования обычно удовлетворительная. Недостаток заключается в том, что решение, как правило, не является глобально оптимальным из-за нелинейности модели системы и модели измерения.

Гибридные модели

Третий класс методов — это комбинация моделей, например, физической модели и модели обучения. Например, рассматривается комбинация модели по формуле (6) [31] и расширенной фильтрации Калмана для оценки движения судна [32]. Модель (6) описывает общие закономерности движения судна:

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) + w_x(t). \quad (15)$$

А модель измерения $z(k)$ в расширенном фильтре Калмана в формуле (14) сформулирована как линейная модель, где положение судна доступно на каждом временном шаге:

$$z(k) = \begin{bmatrix} z_x(k) \\ z_y(k) \end{bmatrix}, \quad h(x(k)) = \begin{bmatrix} x(k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y(k) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

где $z_x(k)$ и $z_y(k)$ — измерения положения x и y рассматриваемого судна. После определения модели движения (модели системы) (15) и модели измерения (16) можно использовать стандартные расширенные этапы фильтрации Калмана для слежения и прогнозирования.

Вместо модели (6) можно использовать другие физические модели, чтобы иметь другую способность к обучению. Преимущество этой гибридной модели заключается в том, что, обладая возможностями модели (6), этот метод может прогнозировать несколько типов движения судна (см. выше) и, кроме того, может одновременно прогнозировать местоположение, скорость и ускорение, используя только ввод координат судна. Недостатком является то, что предположение о начальном состоянии системы и предположение о шумах оказывают большое влияние на производительность алгоритма.

Эти типы гибридных моделей представляют собой комбинацию различных алгоритмов обучения

для получения лучших результатов оценки движения судна. Они представляют собой комбинацию двух компонентов: один для изучения характеристик движения судна, а другой для оптимизации общей производительности модели. Например, комбинация метода опорных векторов наименьших квадратов (LS-SVM) и оптимизации роя частиц (PSO) описаны в [33]; сочетание нейронной сети (НС) и генетической оптимизации (ГА) [20]; сочетание фильтра Калмана и нейронной сети.

По сравнению с одно-модельными много-модельные гибридные методы могут автоматически выбирать группу оптимальных параметров и обучать алгоритм машинного обучения для обеспечения хорошей способности к обобщению и, следовательно для уменьшения участия человека. Как правило, много-модельные методы позволяют достигать лучших результатов. Недостаток много-модельных методов заключается в том, что процесс обучения может затянуться, поскольку компонент оптимизации должен запускать компонент обучения множество раз, чтобы найти оптимальное решение.

Заключение

В настоящее время проводится множество исследований по прогнозированию движения судна. В статье дан краткий предварительный анализ динамической информации АИС с выделением ее главных особенностей. Ставится задача прогноза: по временным рядам наблюдений предсказать будущие значения измеряемых характеристик движения судна. Динамика во времени получения информации по АИС представляется с разным шагом дискретизации (Δt), кроме того иногда наблюдаются пропуски, скачки, выбросы информации, а это создаёт необходимость использования специальных методов для «ремонта» и синхронизации ВР АИС. Движение судна характеризуется тенденциями изменения уровней (рост, снижение или постоянство) и отклонением (колебаний), т.е. наблюдается череда периодов с разной динамикой: стационарные ряды переходят в нестационарные и наоборот (сегментация). Этот процесс происходит в момент разладки - обнаружения резкого изменения свойств наблюдаемого параметрического ряда,

происходящего в неизвестный заранее момент времени. Представленный анализ информации АИС показывает, что для описания движения судна в режиме реального времени не существует универсального метода прогнозирования временных рядов, каждый метод находит свое применение для разных видов движения и разных типов временных рядов.

В целом исследования по прогнозированию движения судна на основе данных АИС можно разделить на методы, основанные на статистике, и методы, основанные на нейронных сетях и глубоком обучении. Метод прогнозирования, основанный на статистике, заключается в построении математической модели движения судна на основе исторических данных. Большинство методов прогнозирования движения судна, основанных на статистике, имеют преимущества простоты и быстрого расчета. Однако в нелинейных средне- и долгосрочных сценариях статистические методы прогнозирования не имеют хорошей применимости, и возникает проблема низкой точности прогнозирования. Например, фильтр Калмана имеет линейные характеристики и не может обеспечить оптимальный эффект оценки в нелинейных сценариях. Появление глубокого обучения обеспечивает многообещающее решение этой проблемы. В рамках исследования прогнозирования траектории на основе нейронных сетей и глубокого обучения исследование прогнозирования траектории судна включает в себя три основные процедуры: обработка данных, проектирование структуры модели и оптимизация модели. При обработке данных могут использоваться методы машинного обучения, такие как кластеризация и фильтрация с разделением обучающих данных на: движение по прямой, циркуляция, разгон и торможение. В более детальных исследованиях движения судна использованы кубическая сплайн-интерполяция и медианная фильтрация для обработки данных, чтобы устранить ошибку измерения и несогласованность временных интервалов данных АИС. Эти методы, основанные на машинном обучении, помогают создавать надежные наборы данных для моделей глубокого обучения и повышать точность прогнозирования моделей.

Литература

1. Maritime Safety Committee (MSC), 100th session, 3-7 December 2018 <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-100th-session.aspx>
2. Вагущенко, Л.Л. Интегрированные системы ходового мостика. – Одесса: Латстар, 2003. – 169 с.
3. Долматов Б.М., Попов В.В. Научные аспекты создания информационно-идентификационных систем безопасности мореплавания в портах Южного бассейна России. – М.: РосКонсульт, 2001. - 496с.
4. Рекомендации по использованию судовых станций автоматической идентификационной системы (AIS) для решения задач предупреждения столкновений судов. – М.: ГУП Мортехинформреклама, 2005 – 55 с.
5. Кошевой В.М., Шишкин А.В., Купровский В.И. Система и устройства автоматической идентификации судов: Учебное пособие. – Одесса: ОНМА, 2005. – 79 с.
6. Трусов, С. В. Перспективы использования спутниковой аппаратуры для обмена информацией с морскими судами в ОВЧ-диапазоне с использованием сообщений AIS, ASM, VDE. Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы том 8, выпуск 4. 2021. - С. 36–46.
7. Лоскутов А. Ю. Анализ временных рядов. Курс лекций. Физический факультет МГУ. Курс лекций. – М.: Физический факультет МГУ (год неизвестен). – 113 с.
8. Астреин В.В., Филатов В.И. Принципы автоматического мониторинга и контроля движения судна в режиме реального времени. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 158—168. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.020
9. Peter J Brockwell, Peter J Brockwell, Richard A Davis, and Richard A Davis. Introduction to time series and forecasting. Springer, 2016.

10. A. Aldweesh, A. Derhab, and A. Z. Emam, "Deep learning approaches for anomaly-based intrusion detection systems: A survey, taxonomy, and open issues. Knowledge-Based Systems, vol. 189, p. 105124, 2020
11. Бокс Дж., Дженкинс Г.М. Анализ временных рядов, прогноз и управление. М.:Мир, 1974. 406 с.
12. Sarvani A., Venugopal B., Devarakonda N. (2019) Anomaly Detection Using K-means Approach and Outliers Detection Technique. In: Ray K., Sharma T., Rawat S., Saini R., Bandyopadhyay A. (eds) Soft Computing: Theories and Applications. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 742. Springer, Singapore.
13. Юдин Ю. И. Математические модели плоскопараллельного движения судна. Классификация и критический анализ / Ю.И. Юдин, И.И. Сотников //Вестник МГТУ. – 2006. – Т. 9, №2, - С.200-208.
14. X. R. Li and V. P. Jilkov, "Survey of maneuvering target tracking. part i. dynamic models," Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, vol. 39, no. 4, pp. 1333–1364, 2003.
15. Першиц, Р. Я. Управляемость и управление судном / Р. Я. Першиц. - Ленинград: Судостроение, 1983. - 272 с.
16. E. Semerdjiev and L. Mihaylova, "Variable-and fixedstructure augmented interacting multiple model algorithms for manoeuvring ship tracking based on new ship models," International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, vol. 10, no. 3, pp. 591–604, 2000.
17. В. В. Воронина, А. В. Михеев, Н. Г. Ярушкина, К. В. Святлов. Теория и практика машинного обучения: учебное пособие/ – Ульяновск: УлГТУ, 2017 – 290 с.
18. А.В. Кугаевских, Д.И. Муромцев, О.В. Кирсанова. Классические методы машинного обучения. – СПб: Университет ИТМО, 2022 – 53 с.
19. Безручко Б. П., Смирнов Д. А. Математическое моделирование и хаотические временные ряды. Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 2005 320 с.
20. A. Khan, C. Bil, and K. E. Marion, "Ship motion prediction for launch and recovery of air vehicles," in OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE. IEEE, 2005, pp. 2795–2801.
21. T. Xu, X. Liu, and X. Yang, "A novel approach for ship trajectory online prediction using bp neural network algorithm." Advances in Information Sciences & Service Sciences, vol. 4, no. 11, 2012.
22. U. Simsir, M. F. Amasyali, M. Bal, U. B. Celebi, and S. Ertugrul, "Decision support system for collision avoidance of vessels," Applied Soft Computing, vol. 25, pp. 369–378, 2014.
23. U. Simsir and S. Ertugrul, "Prediction of manually controlled vessels position and course navigating in narrow waterways using artificial neural networks," Applied Soft Computing, vol. 9, no. 4, pp. 1217–1224, 2009.
24. D. Zissis, E. K. Xidias, and D. Lekkas, "Real-time vessel behavior prediction," Evolving Systems, pp. 1– 12, 2015.
25. Z. Pietrzykowski and C. Reich, "Prediction of ship movement in a restricted area using artificial neural networks," in international conference on advanced computer systems, 2000, pp. 286–293.
26. Z. Jiehua, P. Xiafu, L. Lisang, and H. Dongwei, "Nonlinear ship motion prediction via a novel high precision rbf neural network." Advances in Information Sciences & Service Sciences, vol. 3, no. 10, 2011.
27. D. Peng and Z. Yi, "A new algorithm for sequential minor component analysis," Int. J. Comput. Intell. Res, vol. 2, no. 2, pp. 207–215, 2006.
28. S. Bartelmaos, K. Abed-Meraim, and S. Attallah, "Fast algorithms for minor component analysis," in Statistical Signal Processing, 2005 IEEE/SP 13th Workshop on. IEEE, 2005, pp. 239–244
29. J. D. Hamilton, Time series analysis. Princeton university press Princeton, 1994, vol. 2.
30. M. S. Grewal, Kalman filtering. Springer, 2011
31. R. A. Best and J. Norton, "A new model and efficient tracker for a target with curvilinear motion," Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, vol. 33, no. 3, pp. 1030–1037, 1997
32. L. P. Perera and C. G. Soares, "Ocean vessel trajectory estimation and prediction based on extended Kalman filter," in Proc. 2nd Int. Conf. on Adaptive and Self adaptive Systems and Applications, 2010, pp. 14–20
33. B. Zhou and A. Shi, "Lssvm and hybrid particle swarm optimization for ship motion prediction," in Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), 2010 International Conference on. IEEE, 2010, pp. 183–186.
34. A. Stateczny and W. Kazimierski, "Multisensor tracking of marine targets-decentralized fusion of kalman and neural filters," International Journal of Electronics and Telecommunications, vol. 57, no. 1, pp. 65–70, 2011.
35. X.-r. Guo, F.-h. Wang, D.-f. Du, and X.-l. Guo, "An improved neural network based fuzzy self-adaptive kalman filter and its application in cone picking robot," in Machine Learning and Cybernetics, 2009 International Conference on, vol. 1. IEEE, 2009, pp. 573–577.

References

1. Maritime Safety Committee (MSC), 100th session, 3-7 December 2018 <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-100th-session.aspx>
2. L.Vagushchenko. Integrated navigation bridge systems. – Odessa: Latstar, 2003. – p.169.
3. V.Dolmatov, V. Popov. Scientific aspects of creating information and identification systems for navigation safety in the ports of the Southern Basin of Russia. – M.: RosConsult, 2001. – p. 496.
4. Recommendations for the use of ship stations of the automatic identification system (AIS) to solve problems of preventing ship collisions. – M.: State Unitary Enterprise Mortechnikinformreklama, 2005 – p. 55.
5. V. Koshevoy, A. Shishkin, V. Kuprovsky. System and devices for automatic identification of ships: Textbook. – Odessa: ONMA, 2005. – p. 79.
6. S. Trusov. Prospects for the use of satellite equipment for exchanging information with sea vessels in the VHF range using AIS, ASM, VDE messages. Rocket and space instrumentation and information systems volume 8, issue 4. 2021. – pp. 36–46.
7. Loskutov. Analysis of time series. Lecture course. Faculty of Physics, Moscow State University. Lecture course. – M.: Faculty of Physics of Moscow State University (year unknown). – p.113.

8. V. Astrein, V. Filatov. Principles of automatic monitoring and control of vessel movement in real time. Marine intelligent technologies. 2023. No. 1 part 1, pp. 158-168. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.020
9. Peter J Brockwell, Peter J Brockwell, Richard A Davis, and Richard A Davis. Introduction to time series and forecasting. Springer, 2016.
10. Aldweesh, A. Derhab, and A. Z. Emam, "Deep learning approaches for anomaly-based intrusion detection systems: A survey, taxonomy, and open issues. Knowledge-Based Systems, vol. 189, p. 105124, 2020
11. Box J., Jenkins G.M. Time series analysis, forecast and management. M.:Mir, 1974. p. 406.
12. Sarvani A., Venugopal B., Devarakonda N. (2019) Anomaly Detection Using K-means Approach and Outliers Detection Technique. In: Ray K., Sharma T., Rawat S., Saini R., Bandyopadhyay A. (eds) Soft Computing: Theories and Applications. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 742. Springer, Singapore.
13. Y. Yudin. Mathematical models of plane-parallel motion of a vessel. Classification and critical analysis / Yu.I. Yudin, I.I. Sotnikov // Bulletin of MSTU. – 2006. – T. 9, No. 2, - pp. 200-208.
14. X. R. Li and V. P. Jilkov, "Survey of maneuvering target tracking. part i. dynamic models," Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, vol. 39, no. 4, pp. 1333–1364, 2003.
15. R. Pershits. Controllability and control of the vessel / R. Ya. Pershits. - Leningrad: Shipbuilding, 1983. – p. 272.
16. E. Semerdjiev and L. Mihaylova, "Variable-and fixedstructure augmented interacting multiple model algorithms for manoeuvring ship tracking based on new ship models," International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, vol. 10, no. 3, pp. 591–604, 2000.
17. V. Voronina, A. Mikheev, N. Yarushkina, K. Svyatov. Theory and practice of machine learning: textbook. – Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2017 – p. 290.
18. Kugaevskikh, D. Muromtsev, O.Kirsanova. Classical machine learning methods. – St. Petersburg: ITMO University, 2022 – p.53.
19. Bezruchko, D. Smirnov. Mathematical modeling and chaotic time series. Saratov: State Scientific Center "College", 2005 p. 320.
20. Khan, C. Bil, and K. E. Marion, "Ship motion prediction for launch and recovery of air vehicles," in OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE. IEEE, 2005, pp. 2795–2801.
21. T. Xu, X. Liu, and X. Yang, "A novel approach for ship trajectory online prediction using bp neural network algorithm." Advances in Information Sciences & Service Sciences, vol. 4, no. 11, 2012.
22. U. Simsir, M. F. Amasyali, M. Bal, U. B. Celebi, and S. Ertugrul, "Decision support system for collision avoidance of vessels," Applied Soft Computing, vol. 25, pp. 369–378, 2014.
23. U. Simsir and S. Ertugrul, "Prediction of manually controlled vessels position and course navigating in narrow waterways using artificial neural networks," Applied Soft Computing, vol. 9, no. 4, pp. 1217–1224, 2009.
24. D. Zissis, E. K. Xidias, and D. Lekkas, "Real-time vessel behavior prediction," Evolving Systems, pp. 1– 12, 2015.
25. Z. Pietrzykowski and C. Reich, "Prediction of ship movement in a restricted area using artificial neural networks," in international conference on advanced computer systems, 2000, pp. 286–293.
26. Z. Jiehua, P. Xiafu, L. Lisang, and H. Dongwei, "Nonlinear ship motion prediction via a novel high precision rbf neural network." Advances in Information Sciences & Service Sciences, vol. 3, no. 10, 2011.
27. D. Peng and Z. Yi, "A new algorithm for sequential minor component analysis," Int. J. Comput. Intell. Res, vol. 2, no. 2, pp. 207–215, 2006.
28. S. Bartelmaos, K. Abed-Meraim, and S. Attallah, "Fast algorithms for minor component analysis," in Statistical Signal Processing, 2005 IEEE/SP 13th Workshop on. IEEE, 2005, pp. 239–244
29. J. D. Hamilton, Time series analysis. Princeton university press Princeton, 1994, vol. 2.
30. M. S. Grewal, Kalman filtering. Springer, 2011
31. R. A. Best and J. Norton, "A new model and efficient tracker for a target with curvilinear motion," Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, vol. 33, no. 3, pp. 1030–1037, 1997
32. L. P. Perera and C. G. Soares, "Ocean vessel trajectory estimation and prediction based on extended Kalman filter," in Proc. 2nd Int. Conf. on Adaptive and Self adaptive Systems and Applications, 2010, pp. 14–20
33. Zhou and A. Shi, "Lssvm and hybrid particle swarm optimization for ship motion prediction," in Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), 2010 International Conference on. IEEE, 2010, pp. 183–186.
34. Stateczny and W. Kazimierski, "Multisensor tracking of marine targets-decentralized fusion of kalman and neural filters," International Journal of Electronics and Telecommunications, vol. 57, no. 1, pp. 65–70, 2011.
35. X.-r. Guo, F.-h. Wang, D.-f. Du, and X.-l. Guo, "An improved neural network based fuzzy self-adaptive kalman filter and its application in cone picking robot," in Machine Learning and Cybernetics, 2009 International Conference on, vol. 1. IEEE, 2009, pp. 573–577.

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 О Б АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Астреин Вадим Викторович, доктор технических наук, капитан дальнего плавания, профессор кафедры «Судовождение», государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. E-mail: Astrein-vadim@rambler.ru.

Vadim V. Astrein, Doctor of technical sciences, Master Marine, Professor of the Department of Navigation, Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. E-mail: Astrein-vadim@rambler.ru.

Кондратьев Сергей Иванович, ректор, государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, доктор технических наук, профессор. 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. E-mail: zur_mga@nsma.ru.

Sergey I. Kondratiev, Doctor of technical sciences, Professor, Rector, Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. E-mail: zur_mga@nsma.ru.

Боран-Кешишьян Анастас Леонидович, проректор по конвенционной подготовке и филиалам, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры «Судовождение», государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. E-mail: zur_mga@nsma.ru.

Anastas L. Boran-Keshishyan, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Navigation, Vice-Rector for Conventional Training and Branches, Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. E-mail: zur_mga@nsma.ru.

Астреина Людмила Борисовна, кандидат географических наук, доцент кафедры «Судовождение», 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, Associate Professor of the Department of Navigation, Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. E-mail: astreina-ludmila@gmail.com.

Филатов Виктор Иванович, кандидат технических наук, старший помощник капитана, государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. E-mail: Filatov_viktor1994@mail.ru.

Viktor I. Filatov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Officer, Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. E-mail: Filatov_viktor1994@mail.ru.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 04.12.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 21.12.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 27.12.2023.

Научная статья

УДК 639.3

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.021>**Обзор интеллектуальных систем управления и робототехнических задач в производстве аквакультуры**Ле В.Н.¹ lenghia18071999@gmail.com, Ронжин А.Л.² ronzhin@iias.spb.su¹ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», ²Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Аннотация. В статье проанализированы основные проблемы внедрения цифровых технологий и роботов при производстве аквакультуры, обсуждаются перспективные направления исследований, необходимых при цифровой трансформации производства аквакультуры. Оперативная и точная диагностика качества воды, донных отложений, количества корма, роста и заболеваний рыб посредством дистанционной обработки и классификации изображений, поступающих со стационарных подводных видеокамер, на основе технологий искусственного интеллекта и Интернета вещей помогает предотвратить распространение болезней, минимизировать экономические потери и повысить безопасность пищевых продуктов. Интеллектуальные подводные роботы вместо водолазов используются при проверке повреждений сетей садков и оборудования. Формализация экспертных междисциплинарных знаний по ихтиологии, экологии, робототехнике, машинному обучению, другим технологиям искусственного интеллекта и разработка фундаментальных и технологических основ высокопродуктивного и экологически чистого рыбоводства, прогнозирования и проактивного управления полного жизненного цикла производства аквакультуры способствует обеспечению продовольственной безопасности, суверенитета и лидерства Российской Федерации в сфере высокотехнологичной аквакультуры, водных биологических ресурсов.

Ключевые слова: интеллектуальная рыбная ферма, технологии искусственного интеллекта, Интернет вещей, техническое зрение, классификация видов рыб, роботы в аквакультуре, автоматические кормушки, диагностика болезней рыб.

Для цитирования: Ле В.Н., Ронжин А.Л. Обзор интеллектуальных систем управления и робототехнических задач в производстве аквакультуры, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 171—180. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.021

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.021>**Review of intelligent control systems and robotic tasks in aquaculture production**Van N. Le¹ lenghia18071999@gmail.com, Andrey L. Ronzhin² ronzhin@iias.spb.su¹Military training and scientific center of the Navy «Naval Academy», St. Petersburg, Russian Federation,²St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation

Abstract. The article analyzes the main problems of introducing digital technologies and robots in aquaculture production, discusses promising areas of research necessary for the digital transformation of aquaculture production. Rapid and accurate diagnosis of water quality, bottom sediments, amount of feed, growth and diseases of fish through remote processing and classification of images, coming from stationary underwater video cameras, based on artificial intelligence and Internet of Things technologies, helps prevent the spread of diseases, minimize economic losses and improve food safety. Intelligent underwater robots are used instead of divers to check for damage to cage networks and equipment. Formalization of expert interdisciplinary knowledge in ichthyology, ecology, robotics, machine learning, other artificial intelligence technologies and the development of fundamental and technological foundations of highly productive and environmentally friendly fish farming, forecasting and proactive management of the full life cycle of aquaculture production helps ensure food security, sovereignty and leadership of the Russian Federation in the field of high-tech aquaculture, aquatic biological resources.

Key words: intelligent fish farm, artificial intelligence technologies, Internet of things, technical vision, classification of fish species, robots in aquaculture, automatic feeders, diagnosis of fish diseases.

For citation: Van N. Le, Andrey L. Ronzhin, Review of intelligent control systems and robotic tasks in aquaculture production, Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 171—180. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.021

Введение

По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации (FAO) в 1970-х годах производство аквакультуры составляло 3 миллиона тонн товарной продукции, а к 2017 году объем постоянно увеличивался и достиг свыше 80 миллионов тонн. Рыбная продукция является источником различных витаминов и потребность в

них постоянно растет. Среди них белок, витамин D и жирные кислоты омега-3, которые полезны для тела и мозга, а также снижают риск сердечных заболеваний и поддерживают здоровье беременных женщин. Когда спрос на водные ресурсы значительно увеличился, рыбная промышленность столкнулась с серьезной проблемой сохранения баланса потребностей в поставках и защитой ресурсов от морской среды. Традиционное

рыболовство, хотя когда-то и являлось основным источником пищи, оказывает нежелательное воздействие на морскую экологию и биоразнообразие. В этой ситуации аквакультура является потенциальным решением для более устойчивого удовлетворения спроса на продукцию водных ресурсов.

В традиционном производстве аквакультуры все технологические этапы, такие как подготовка воды, выведение породы, кормление и уход в процессе выращивания, выполняются вручную. Рассмотрим несколько примеров технологических операций, выполняющихся в настоящее время вручную, но от их качества и оперативности зачатую зависит выживаемость всей выращиваемой продукции. Например, одним из регулярных процессов, требующих постоянного контроля, является водоподготовка. Пробы воды берутся вручную два раза в день. Этот процесс занимает много времени и не может обеспечить быструю очистку воды в отдельных случаях, когда качество воды в пруду/резервуаре внезапно меняется. Или другой пример, возникновение болезни рыбы, выращиваемой в прудах, достаточно сложно диагностировать на ранних стадиях, и лечение начинается только тогда, когда отдельные особи умирают и всплывают на поверхность воды. Расчет количества выдаваемого корма, мониторинг остатков несъеденного оседающего на дне под садками вместе с продуктами метаболизма, загрязняющих акваторию, вызывающих гниение, снижение кислорода в воде и гибель выращиваемой продукции в конечном итоге. Наконец, еще один ручной трудоемкий процесс, отнимающий много времени и сил – это предпродажный подсчет рыбы, где каждая особь отдельно обрабатывается. Четыре вышеперечисленных примера требуют ручного труда и значительно влияют на прибыль в производстве аквакультуры [1].

Таким образом, для решения проблем традиционного рыбоводства и развития интеллектуальных технологий аквакультуры необходимо применение роботов, стационарных сенсорных и активационных устройств взаимодействующих по проводным и беспроводным средствам связи в водной и подводной инфраструктуре. Сочетание технологий и экспертных знаний искусства ведения сельского хозяйства открывает новые перспективы интеллектуальной индустрии аквакультуры, где технологии искусственного интеллекта (ИИ), Интернета вещей (IoT), системы автоматизации и робототехника меняют способы управления и производства. Эти технологии от управления качеством воды до мониторинга здоровья особей аквакультуры меняют традиционный ландшафт отрасли, создают новые возможности для роста производства, помогая создать устойчивую среду для рыбоводства.

Цифровая трансформация отрасли рыбоводства на основе беспроводных средств связи, технологий

Интернета вещей в сочетании с облачными вычислительными ресурсами требует формирования трех основных технологических уровней: оборудование, сетевые службы и облачные сервисы (рис. 1). Уровень устройств включает датчики, технологическое оборудование, контроллеры и терминалы сбора данных. Датчики собирают информацию об окружающей среде, такую как: pH кислотность, температура, соленость, электропроводность, содержание кислорода, азота, нитрита, уровень воды, а также видеоизображения, позволяющие оценить поведение и болезни, возникающие при производстве аквакультуры. К технологическому оборудованию относятся генераторы кислорода, дозаторы корма, клапаны насосов и др. На сетевом уровне часто используются беспроводные соединения, такие как Bluetooth, Wi-Fi, 3G/4G, Lo-Ra, NB-IoT и другие технологии беспроводной передачи данных, обеспечивающие связь между устройствами и облачными сервисами. Перечисленные беспроводные технологии эффективны для передачи данных в воздушном пространстве и сильно ограничены в водной среде, поэтому, как правило конечные сенсорные и активационные устройства под водой связаны кабельными средствами с надводными трансляторами беспроводной связи. Более детально современные системы подводной связи, позиционирования и навигации роботов в водной среде описаны в работе [2].

Облачные сервисы включают платформы и мобильные приложения, предназначенные для хранения, обработки данных и предоставления полезной справочной информации, пользовательские сервисы по автоматизации производства аквакультуры. Применение систем Интернета вещей в аквакультуре имеет явные преимущества, но при увеличении степени автоматизации или масштабировании производства сразу происходит рост количества датчиков, объема анализируемых параметров и хранящихся данных. В связи с чем становятся актуальными проблемы кибербезопасности и оптимизации вычислительных затрат, особенно при крупномасштабном рыбном хозяйстве и систем промышленной очистки воды [3-4].

Далее во разделе 1 обсуждаются проблемы и подходы к решению задач автоматической классификации видов рыб, выявления больных рыб и различных патогенов на основе технологий искусственного интеллекта и Интернета вещей. В разделе 2 проанализированы интеллектуальные системы, уже применяемые на существующих производствах рыбохозяйственных предприятий. В разделе 3 рассмотрены прототипы роботов, используемые для мониторинга рыб и окружающей подводной среды в садковом производстве аквакультуры.

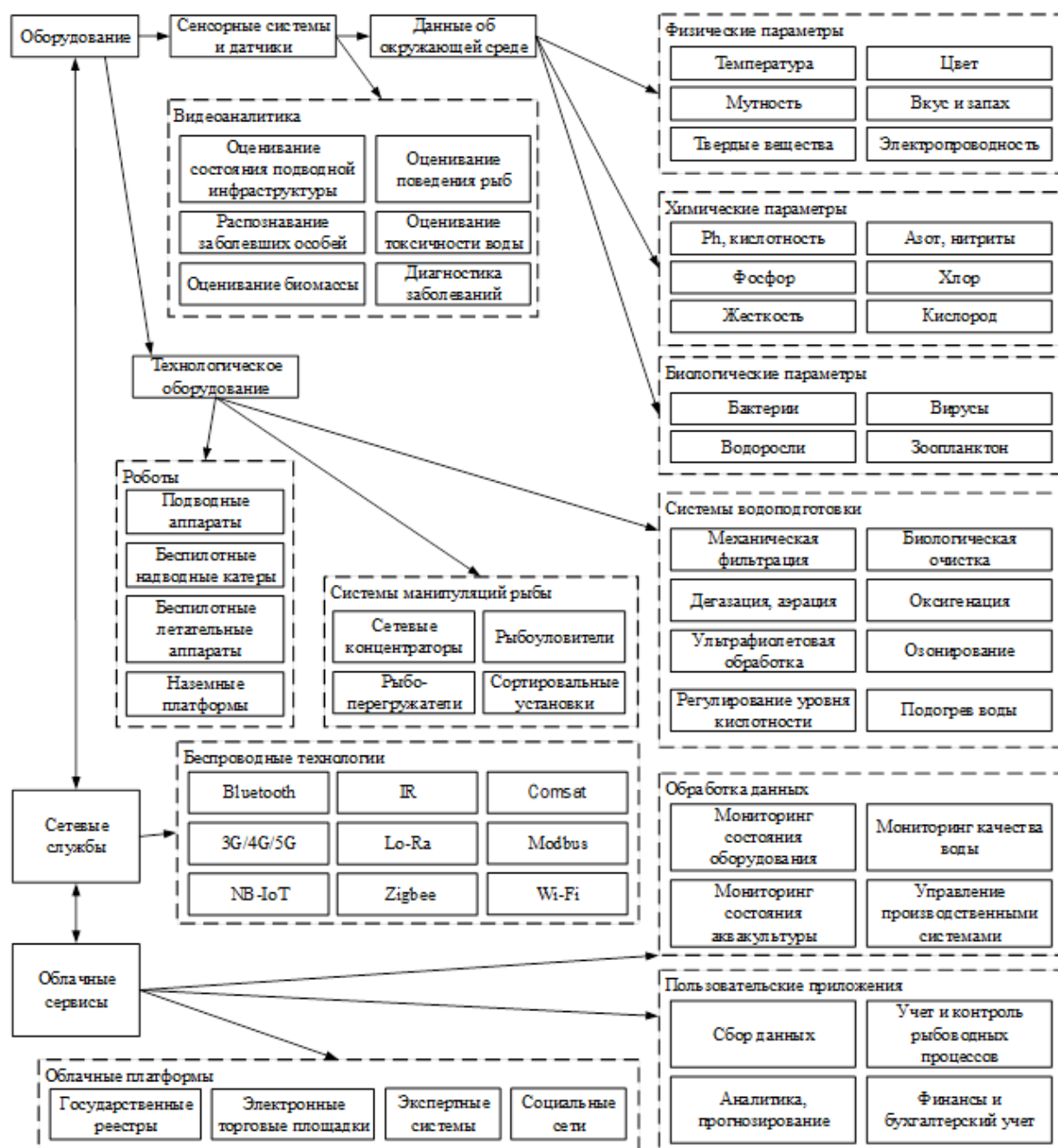


Рис. 1. Уровни технических средств интеллектуализации производства аквакультуры

1. Методы классификации видов рыб и заболевших особей

В мировой базе данных FishBase [5] зарегистрировано около 30000 видов рыб. В 2018 году Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций (FAO) зарегистрировала 622 вида продукции аквакультуры, из них 83,6% приходится всего на 20 видов выращиваемой рыбы [6]. Разнообразие климатических и экологических условий, используемой пресной, солоноватой, морской и внутренней соленой воды сформировало многообразные производственные технологии аквакультуры. Классификация и обнаружение заболевших рыб является важной задачей для

повышения эффективности промышленной аквакультуры. Применение технологий искусственного интеллекта и интернета вещей открывает новые перспективы в определении заболевших рыб, диагностировании вида болезни, своевременном разделении здоровых и заболевших в процессе разведения [7].

В работе [8] обсуждается проблема классификации морских и пресноводных видов рыб, актуальная при управлении их популяциями совместно развивающихся в естественной или искусственной водной среде. Градиентно-взвешенный метод разметки и активации категорий (Grad-CAM) используется для визуализации и понимания особенностей моделей разных видов рыб, их форм и цветов. По сравнению с традиционными сверточными нейронными сетями

предложенный метод трансферного обучения с преобразованиями изображений по результатам экспериментов показал высокую точность классификации видов морской рыбы с низким разрешением изображений – 94,33% и для пресноводной рыбы с высоким разрешением – 98,34%.

Недостатками методов распознавания видов рыбы на основе машинного обучения являются необходимость априорных экспертных знаний, длительная ручная подготовка данных [9]. Алгоритмы глубокого обучения на основе сверточных нейронных сетей способны прогнозировать, обучаясь на основе входных данных и синтетических изображений, и обладают превосходной вычислительной производительностью [10-11].

В работе [12] обсуждается задача классификации различных видов Кой-рыб с использованием сверточных нейронных сетей (CNN). Набор данных Кой-рыб был взят из Интернета и включает в себя 1200 изображений для обучения и 300 изображений для тестирования. При извлечении необходимой структуры изображения эксперименты проводились в трех цветовых пространствах: оттенков серого, RGB и HSV, средняя точность классификации составила: 36%, 50% и 48% соответственно. CNN использует алгоритм глубокого обучения для повышения точности классификации различных видов Кой-рыб и обучается с использованием слоёв, способных обнаруживать как простые, так и более сложные шаблоны, и средняя точность составляет 84%.

Болезни рыб в аквакультуре представляют собой значительную угрозу продовольственной безопасности [13-14]. Выявление зараженных видов рыб в аквакультуре остается затруднительным на ранней стадии из-за отсутствия необходимой инфраструктуры. Своевременное выявление зараженной рыбы является обязательным шагом для предотвращения распространения заболевания и снижения экономических потерь в аквакультуре. В работе [15] исследованы болезни лосося, основываясь на сочетании обработки изображений и механизма машинного обучения для определения инфицированных рыб различными возбудителями болезней. Вначале были применены предварительная обработка изображений и их сегментация для уменьшения шума и улучшения качества изображений соответственно. Затем были извлечены характеристики с использованием машины опорных векторов (SVM) и точность классификации заболеваний составила до 94%.

В работе [16] рассмотрена модель распознавания изображений зараженной рыбы в акваториях Индонезии. Модель MobileNetV2 обработки изображений позволяет определить, какие части рыбы заражены, провести сегментацию пораженной области и выделить красные пятна на теле рыбы. Тушка рыбы, зараженная EUS (синдромом язвы животных), затем отображается в виде двоичного результата с порогом HSV. Результаты распознавания пораженных областей на изображениях имели среднюю точность 84%. Созданная модель помогает обычным рыбоводам быстрее выявлять болезни, а фермерам приобретать минимальные знания о выявлении болезней рыб.

В работе [17] обсуждаются ранние методы обнаружения и диагностики заболеваний рыб с использованием различных алгоритмов машинного обучения, включая дерево решений, логическую регрессию, наивный Байесовский классификатор, машину опорных векторов (SVM) и многослойный перцептрон (MLP). Набор данных составлен из изображений рыб с симптомами EUS, а также изображений неинфицированной рыбы. Система на основе SVM для обнаружения и предотвращения EUS у рыб достигла точности 85,24% на исходном наборе данных с использованием полиномиального ядра и 82,75% на расширенном наборе данных с использованием ядра Гаусса.

В работе [18] рассмотрены технологии обработки изображений с видекамеры, флуоресцентной камеры, микроскопа, ультразвуковых датчиков, применяемые для диагностики заболеваний и выявления их возбудителей, отличающиеся точностью и скоростью обработки.

В работе [19] обнаружение болезней рыб проводится на основе сверточных нейронных сетей (CNN) на наборе данных, включающем 90 изображений здоровой рыбы и с двумя типами болезней: белыми и красными пятнами, с точностью до 94%.

2. Интеллектуальные системы управления производством аквакультуры

Цифровая трансформация производства аквакультуры вызвана реальными проблемами сокращения морских рыбных ресурсов, загрязнения морской среды, роста среднего возраста работников и уменьшения количества занятых в рыбохозяйственной отрасли [20-21]. Поэтому переход от традиционной аквакультуры к цифровому интеллектуальному рыбному хозяйству актуален как никогда, поскольку позволяет повысить эффективность, снизить трудозатраты и автоматизировать многие процессы, в том числе контроля водоподготовки, здоровья рыб и качества конечной продукции. Динамика роста рыб во многом зависит от условий водной среды, поэтому управление ее параметрами является приоритетной задачей. В работе [22] обсуждается система мониторинга и управления интеллектуального производства аквакультуры с применением устройств интернета вещей для сбора данных в реальном времени, что позволяет оперативно измерять, оценивать и регулировать параметры воды и другие системные параметры в прудах с рыбой. В этом исследовании была разработана модель глубокого обучения (DL) анализа и прогнозирования роста калифорнийского окуня с точностью до 94%, позволившая автоматизировать систему кормления, сократить пищевые отходы. Таким образом, производство аквакультуры на основе технологий искусственного интеллекта помогает рыбводам оперативно, обоснованно и безопасно управлять различным оборудованием для прудов, а также снизить барьеры для входа в отрасль новых неподготовленных с точки зрения практики кадров.

В работе [23] разработанная система контроля качества воды для прудового рыбоводства собирает данные о температуре, pH, растворенном кислороде, обрабатывает на основе микроконтроллера

STM32L151C8, передает по узкополосной технологии интернета вещей (NB-IoT) на облачную платформу для управления основными технологическим оборудованием. Результаты экспериментов показали, что система обладает высокой точностью, поддерживая температуру в пределах $\pm 0,12^{\circ}\text{C}$, растворенный кислород в пределах $\pm 0,55$ мг/л и pH в пределах $\pm 0,09$, что соответствует потребностям производства и управления качеством воды в производстве аквакультуры.

В работе [24] обсуждается система мониторинга параметров и объема воды в пруду с использованием датчиков Интернета вещей и машинного обучения для прогнозирования выживаемости рыб. Датчики pH, температуры и мутности воды подключены к плате с микроконтроллером на базе Arduino Uno, которая осуществляет передачу и сохранение данных в виде файла CSV на облачной платформе ThingSpeak. Эксперименты по анализу параметров воды проводились на пяти прудах, различающихся по размеру и условиям окружающей среды, с оценением возможности выращивания 11 видов рыб: катла, синга, креветки, мидии, руи, тилапия, пангас, карпио, магур, чешуйница и кои. Анализ проводился с использованием 10 алгоритмов машинного обучения (ML), включая J48, случайный лес, K ближайших соседей (K-NN), K^* , дерево логистической модели (LMT), дерево сокращения ошибок (REPTree), вывод правила перехода с сокращенным поиском (JRIP), частичные деревья решений (PART), таблица решений и логит-буст. По результатам экспериментов выяснилось, что только три из пяти прудов идеальны для разведения рыбы, так как соответствуют необходимым стандартам по pH, температуре, мутности и электропроводности. Алгоритм машинного обучения Random Forest показал наибольшую производительность по точности (94%) и скорости.

В работе [25] обсуждается система беспроводной сети датчиков (WSN) для контроля концентрации растворенного кислорода (DO) и температуры воды при выращивании пресноводных рыб в пруду.

Цифровые двойники технической и технологической инфраструктуры производства аквакультуры позволяют удаленно измерять параметры физических процессов в реальном времени, прогнозировать их развитие и оперативно корректировать алгоритмы управления оборудованием. В работе [26] описан цифровой двойник интеллектуального рыбоводства, включающий четыре основных сервиса: автоматизация процесса кормления рыбы, оценивание метрик выращиваемой рыбы (подсчет числа, размера и веса), мониторинг окружающей среды (параметры воды, целостность сетей и наличие водорослей) и мониторинг здоровья рыб (живучесть, смертность и заболеваемость). Каждый сервис основан на применении технологий искусственного интеллекта, решающих задачи анализа, оптимизации, прогнозирования для поддержки принятия решений с целью повышения прибыли и эффективности производства. Созданный прототип представляет виртуальную среду, доступную через веб-сайт и мобильные устройства,

где пользователи могут наблюдать и управлять процессами рыбного хозяйства.

Максимальный рост биомассы аквакультуры при минимизации производственных затрат является основной целью модернизации рыбохозяйственных технологий, которая может быть достигнута путем оптимизации факторов, которые оказывают наибольшее влияние на рост рыбы: скорость кормления, температура и содержание растворенного кислорода. В работе [27] обсуждаются четыре стратегии управления ростом рыбы: 1) слежение за траекторией роста рыбы, ограничивая при этом потребление корма, температуру и содержание растворенного кислорода; 2) слежение за отношением потребляемого корма к скорости роста рыбы; 3) слежение за балансом между траекторией скорости роста, потребляемой энергией и затратами на корм; 4) слежение за максимизацией скорости роста рыбы при минимизации затрат. Предложенные математические модели были апробированы реальном биологическом процессе жизнедеятельности рыбы *Nilotic* (*Oreochromis niloticus*) и подтвердили возможность оптимизации стратегий управления в зависимости от вида рыбы, цен на корм и потребляемые ресурсы, времени выращивания.

Оценивание качества кормления рыбы необходимо в режиме реального времени во избежание недокорма или перекорма, поскольку если рыбу кормить недостаточно, то качество и количество рыбной продукции снижаются. Однако перекармливание рыбы приводит к снижению прибыли из-за потери корма, негативного воздействия на окружающую среду. Интеллектуальные системы кормления в аквакультуре помогают оценить уровень сытости рыбы и контролировать подачу корма. В работе [28] представлен метод оценки интенсивности кормления рыб в аквакультуре, применяющий трехмерную сверточную нейронную сеть (3D CNN) для обработки снимков поверхности воды в цвете RGB, сделанных с помощью беспилотных летательных аппаратов. Метод показал точность до 95% при распознавании четырех уровней интенсивности кормления рыбы: «отсутствие», «слабое», «среднее» и «сильное».

В работе [29] проанализирован потенциал применения технологий искусственного интеллекта, Интернета вещей, облачных вычислений и революционных изменений с их помощью в отрасли производства аквакультуры. Беспилотные гетерогенные аппараты в воздушной, надводной и подводной средах, нано- и микро-сенсоры, биороботы, беспроводные камеры, интеллектуальные технологии идентификации, распознавания, классификация, сегментации данных, энергосберегающие устройства помогают снизить зависимость от человеческого фактора и повысить эффективность производства аквакультуры за счет дозированной подачи корма, раннего обнаружения заболеваний, прогнозирования роста, мониторинга окружающей среды, экономической информации о рынке и других аспектов. Это не только способствует сокращению зависимости от кадровых ресурсов, но и улучшает качество производимой рыбной продукции на основе передовых цифровых и роботизированных технологий.

3. Роботы для мониторинга водной среды и обслуживания инфраструктуры производства аквакультуры

С истощением морских ресурсов развития марикультуры переместилось с прибрежных районов в глубоководные морские акватории [30]. При глубоководном садковом выращивании качество и состояние сетей являются важными факторами и при долгосрочном производстве аквакультуры сетчатые садки, подвергаясь чрезмерному воздействию гидродинамических нагрузок океанских волн, естественной эрозии, получают повреждения, что приводит к потерям продукции аквакультуры [31–33].

Работа профессионального дайвера для осмотра, выявления повреждений, ремонта сетей или их очистки водорослей является тяжелой и опасной. В крупномасштабных промышленных садковых производствах аквакультуры радиус и глубина сетей садков могут достигать более 15 м, что делает рабочую среду для дайвера крайне небезопасной при выполнении подводной работы в океане в течение длительного времени. Поэтому потребность интеллектуальных роботов для мониторинга и обслуживания сетей под водой становится очевидной. В работе [34] разработан прототип биоморфного робота-тунца, оснащенный трехмерной системой управления, который движется по спирали для проверки глубоководных сетей. Кинематическая модель движения робота основана на применении двойного сустава, аналогичного у тунца, с дополнительным устройством тяги на хвосте, обеспечивающим гибкость движения. Система управления использует метод нечеткой логики на основе пропорционально-интегрально-дифференциального регулирования для контроля скорости спуска и углом поворота во время движения по спирали, что позволило роботу перемещаться по заранее заданному эталонному пути в условиях возмущающих воздействий подводных течений и других негативных факторов.

В работе [35] представлен робот-дельфин с трехмерной маневренностью, используемый для мониторинга качества воды. Конфигурация включает поясничный двигатель для дорсовентральных колебаний и два плавника с независимым управлением для осуществления трехмерных маневров. Разнообразные бортовые датчики применяются для повышения осведомленности об окружающей среде при движении робота, а также анализе параметров качества воды в режиме реального времени.

В работе [36] описан способ автоматического построения карты загрязнения воды с помощью роботов-рыб с ультразвуковым позиционированием. Автоматический мониторинг — одна из важных функций подводных аппаратов, контролирующих показатели загрязнения воды. При обнаружении препятствия на своем пути робот меняет направление, чтобы избежать столкновения, следует как можно ближе к заданному маршруту, чтобы получить точную карту загрязнения водоема. Робот-рыба использует ультразвуковое позиционирование в сочетании с гидролокационной системой для передачи сигналов и расчета точной информации о своем местоположении.

В работе [37] описана событийно-ориентированная система управления роботом для

мониторинга качества воды и кормления пресноводных красных раков (*Cherax Quadricarinatus*). Робот осуществляет транспортировку многопараметрического водного зонда и шести контейнеров для раздачи корма по поверхности пруда, оснащен контроллером для дозирования точного количества корма из контейнеров согласно графику кормления, который может корректироваться удаленно через клиентское приложение. Функциональная модель робота описана с использованием унифицированного языка моделирования (UML), который определяет структуру и поведение всех компонентов. Проведенные эксперименты показали эффективность применения роботов при интенсивном выращивании раков.

Заключение

Очевидные проблемы сокращения естественных рыбных запасов, ухудшения экологического состояния акваторий в местах интенсивного рыбоводства, сокращения квалифицированного кадрового потенциала и увеличения среднего возраста работников актуализируют переход от традиционного производства аквакультуры к ее цифровой трансформации с применением передовых технологий искусственного интеллекта, больших данных, Интернета вещей, сенсорных сетей, технического зрения и робототехники. Стационарные автоматические системы прежде всего развиваются в области мониторинга и управления качеством воды в прудах и установках замкнутого водоснабжения, кормлением рыб, оценивания вида, количества, размера и веса рыб и их здоровья. Выявление и диагностика заболевших рыб отдельная трудоемкая задача, требующая анализа микроорганизмов-переносчиков болезней, поэтому способность автоматических систем оперативно ставить точный диагноз имеет важное значение для борьбы с различными заболеваниями и выживаемости всей стаи рыб. В худшем случае употребление зараженной рыбной продукции может отразиться на здоровье человека.

Интеллектуальные системы аквакультуры на основе цифровых двойников, не только также отслеживают текущие параметры процесса выращивания рыбы, но и прогнозируют дальнейшее состояние, в том числе управляемый рост рыбы, минимизируя затраты за счет поддержания требуемых значений температуры, растворенного кислорода, объема подаваемого корма [38]. Технологии технического зрения обработки подводных изображений позволяет операторам непрерывно наблюдать и анализировать состояние рыбы, обеспечивая при этом качество и безопасность конечной продукции, предоставляя собранные данные клиентам и органам, сертифицирующим пищевые продукты. Таким образом, цифровые интеллектуальные системы управления помогают операторам производства аквакультуры оптимизировать подачу корма, контролировать рост рыбы, повышать ее выживаемость, одновременно оптимизируя коэффициент конверсии корма [39].

Длительное садковое производство со временем требует обслуживания сетей, их контроль целостности и очистку от нарастающих водорослей.

Для решения этих задач особенно для глубоководных сетей актуально применение роботов, производящих мониторинг всех поверхности сетей и монотонные длительные операции по их очистке под водой. Проведенный анализ основных задач цифровизации и роботизации

технологических процессов производства аквакультуры показал актуальность дальнейших исследований по формализации технологического процесса выращивания аквакультуры с применением передовых технологий искусственного интеллекта, Интернета вещей и робототехники.

Литература

1. Vo T. T. E., Ko H., Huh J., Kim Y. Overview of Smart Aquaculture System: Focusing on Applications of Machine Learning and Computer Vision. *Electronics*, 2021, Vol. 10(22), p. 2882. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10222882>
2. Ле В. Н., Ронжин А. Л. Способы и технические средства позиционирования и навигации роботов в водной среде // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2023. № 6(116). С. 167–178. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-167-178
3. Wang C., Li Z., Wang T., Xu X., Zhang X., Li D. Intelligent fish farm—the future of aquaculture. *Aquaculture International*, 2021, Vol. 29, pp 1-31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00773-8>
4. Fedorchenko E., Novikova E., Danilov A., Saenko I. Towards the Testbed and Dataset for Analysis of Water Treatment Systems Security. *Proceedings of the 4th International Conference on Data Science and Applications (ICDSA 2023) – Malaviya National Institute of Technology Jaipur, India – July 14-15, 2023*, Springer Nature Computer Science.
5. Froese R., Pauly D. *Fishbase*, 2010
6. FAO, The State of World Fisheries and Aquaculture 2020: Sustainability in Action, The State of World Fisheries and Aquaculture (SOFIA), vol. 2020, FAO, Rome, Italy, 2020, <https://www.fao.org/documents/card/en/c/CA9229EN>
7. Vásquez-Quispesivana W., Inga M., Betalleluz-Pallardel I. Inteligencia artificial en acuicultura: fundamentos, aplicaciones y perspectivas futuras. *Scientia Agropecuaria*, 2022, Vol. 13(1), p. 79-96. DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.008>
8. Gong B., Dai K., Shao J., Jing L., Chen Y. Fish-TViT: A novel fish species classification method in multiwater areas based on transfer learning and vision transformer. *Heliyon*. 2023, Iss. 6, Vol. 9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16761>
9. Urbanova P., Bozhynov V., Cisar P., Zelezny M. Classification of fish species using silhouettes. *Bioinformatics and Biomedical Engineering*, Springer International Publishing, Cham, 2020, pp. 310–319.
10. Rauf H. T., Lali M. I. U., Zahoor S., Shah S. Z. H., Rehman A. U., Bukhari S. A. C. Visual features based automated identification of fish species using deep convolutional neural networks. *Computers and electronics in agriculture*. 2019, 105075, Vol. 167, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105075>
11. Xu X., Li W., Duan Q. Transfer learning and se-resnet152 networks-based for small-scale unbalanced fish species identification. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021, 105878, Vol. 180. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105878>
12. Cueto M. S., Diangkinay J. M. B., Melencion K. W. B., Senerado T. P., H. L. P. Taytay H. L. P., Tolentino E. R. E. Classification of Different Types of Koi Fish Using Convolutional Neural Network. 2021 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), 2021, pp. 1135-1142, doi: 10.1109/ICICCS51141.2021.9432358
13. Nayak K. K., Pradhan J., Das B. K. Original Research Article Characterization, pathogenicity, antibiotic sensitivity and immune response of *Flavobacterium columnare* isolated from *Cirrhinus mrigala* and *Carassius auratus*. *International journal of current microbiology and applied sciences*. 2014, Vol. 3, N. 11, pp. 273-287
14. Tacon A. G. J., Metian M. Fish Matters: Importance of Aquatic Foods in Human Nutrition and Global Food Supply. *Reviews in Fisheries Science*. 2013, Vol. 21(1), pp. 22–38. DOI: <https://doi.org/10.1080/10641262.2012.753405>
15. Ahmed M. S., Aurpa T. T., Azad M. A. K. Fish disease detection using image based machine learning technique in aquaculture. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2022, Vol. 34(8), P. 5170-5182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.05.003>
16. Rachman F., Akbar M. N. S., Putera E. Fish Disease Detection of Epizootic Ulcerative Syndrome Using Deep Learning Image Processing Technique. In *Proceedings International Conference on Fisheries and Aquaculture*, 2023, Vol. 8, No. 1, pp. 23-34, DOI: <https://doi.org/10.17501/23861282.2023.8102>
17. Sujatha K., Mounika P. Evaluation of ML Models for Detection and Prediction of Fish Diseases: A Case Study on Epizootic Ulcerative Syndrome. 2023 Second International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT). 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICEEICT56924.2023.10156914.
18. Li D., Li X., Wang Q., Hao Y. Advanced Techniques for the Intelligent Diagnosis of Fish Diseases: A Review. *Animals*, 2022, Vol. 12(21), pp. 2938. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani12212938>
19. Hasan N., Ibrahim S., Aqilah Azlan A. Fish diseases detection using convolutional neural network (CNN). *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, 2022, Vol. 13(1), pp. 1977-1984. DOI: 10.22075/IJNAA.2022.5839
20. Sarma K., Kumar A. A., George G., Pandian K., Prabakaran K., Roy S. D., Srivastava R. S. Impact of coastal pollution on biological and biochemical and nutritional status of edible oyster in Phoenix Bay Jetty and North Wandoor of Andaman. *Indian Journal of Animal Sciences*. 2013, N. 83, pp. 321-325.
21. Ogij O. G., Osipov V. Y., Tristanov A. B., Zhukova N. A. Tasks and performance indicators of intelligent neural network support for decisions on managing labor potential of the fishery complex (in english). *Marine intellectual technologies*. 2021. N. 4-4 (54). pp. 73-79. <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.010>

22. Chiu M. C., Yan W. M., Bhat S. A., Huang N. F. Development of smart aquaculture farm management system using IoT and AI-based surrogate models. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2022, Vol. 9, N. 100357. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100357>
23. Huan J., Li H., Wu F., Cao W. Design of water quality monitoring system for aquaculture ponds based on NB-IoT. *Aquacultural Engineering*. 2020, Vol. 90, N. 102088. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102088>
24. Islam M. M., Kashem M. A., Alyami S. A., Moni M. A. Monitoring water quality metrics of ponds with IoT sensors and machine learning to predict fish species survival. *Microprocessors and Microsystems*, 2023, Vol. 102, N. 104930. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2023.104930>
25. Shi B., Sreeram V., Zhao D., Duan S., Jiang J. A wireless sensor network-based monitoring system for freshwater fishpond aquaculture. *Biosystems Engineering*. 2018, Vol. 172, pp. 57-66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.05.016>
26. Ubina N. A., Lan H. Y., Cheng S. C., Chang C. C., Lin S. S., Zhang K. X., Lu H. Y., Cheng C. Y., Hsieh Y. Z. Digital twin-based intelligent fish farming with Artificial Intelligence Internet of Things (AIoT). *Smart Agricultural Technology*. 2023, Vol. 5, N. 100285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100285>
27. Chahid A., N'Doye I., Majoris J. E., Berumen M. L., Laleg-Kirati T. M. Model predictive control paradigms for fish growth reference tracking in precision aquaculture. *Journal of Process Control*. 2021, Vol. 105, pp. 160-168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2021.07.015>
28. Ubina N., Cheng S. C., Chang C. C., Chen H. Y. Evaluating fish feeding intensity in aquaculture with convolutional neural networks. *Aquacultural Engineering*, 2021, Vol. 94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102178>
29. Mustapha U. F., Alhassan A.W., Jiang D. N., Li G. L. Sustainable aquaculture development: a review on the roles of cloud computing, internet of things and artificial intelligence (CIA). *Reviews in Aquaculture*, 2021, Vol. 13, pp. 2076-2091. DOI: <https://doi.org/10.1111/raq.12559>
30. Kongkeo H., Wayne C., Murdjani M., Bunliptanon P., Chien T. Current practices of marine finfish cage culture in China, Indonesia, Thailand and Vietnam. *Aquaculture Asia*, 2010, 15(3)
31. Xu T. J., Dong G. H., Zhao Y. P., Li Y. C., Gui F. K. Analysis of hydrodynamic behaviors of gravity net cage in irregular waves. *Ocean engineering*, 2011, Vol. 38(13), pp. 1545-1554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.07.019>
32. Kristiansen T., Faltinsen O. M. Experimental and numerical study of an aquaculture net cage with floater in waves and current. *Journal of Fluids and Structures*, 2015, Vol. 54, pp. 1-26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2014.08.015>
33. Guo L., Li Z. Effects of nitrogen and phosphorus from fish cage-culture on the communities of a shallow lake in middle Yangtze River basin of China. *Aquaculture*, 2003, Vol. 226, pp. 201-212. DOI: 10.1016/S0044-8486(03)00476-9
34. Chen Y., Qiao J., Liu J., Zhao R., An D., Wei Y. Three-dimensional path following control system for net cage inspection using bionic robotic fish. *Information Processing in Agriculture*. 2022, Vol. 9, P. 100-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.12.002>
35. Wu Z., Liu J., Yu J., Fang H. Development of a Novel Robotic Dolphin and Its Application to Water Quality Monitoring. in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2017, vol. 22, N. 5, pp. 2130-2140. doi: 10.1109/TMECH.2017.2722009
36. Shin D., Na S. Y., Kim J. Y., Baek S. J. Fish Robots for Water Pollution Monitoring Using Ubiquitous Sensor Networks with Sonar Localization. 2007 International Conference on Convergence Information Technology (ICCIT 2007). 2007, pp. 1298-1303, doi: 10.1109/ICCIT.2007.391.
37. Luna F. D. V. B., de la Rosa Aguilar E., J. Suárez Naranjo J. S., Gutiérrez Jagüey J. Robotic System for Automation of Water Quality Monitoring and Feeding in Aquaculture Shadehouse. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, vol. 47, N. 7, pp. 1575-1589. doi: 10.1109/TSMC.2016.2635649.
38. Bekarev A., Ivashko E., Ivashko V. Aquaculture digitalization: Polling karelian fish farmers. *Agriculture Digitalization and Organic Production*. Springer. Smart Innovation, Systems and Technologies 2023. Vol. 362. pp. 363-372.
39. Ражев А. О., Недоступ А. А. Компьютерная имитация поведения рыб в замкнутой системе водоснабжения, *Морские интеллектуальные технологии*. 2023. № 4 часть 1, С. 277—284. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.033

References

1. Vo T. T. E., Ko H., Huh J., Kim Y. Overview of Smart Aquaculture System: Focusing on Applications of Machine Learning and Computer Vision. *Electronics*, 2021, Vol. 10(22), p. 2882. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10222882>
2. Le V. N., Ronzhin A. L. Sposoby i tehicheskie sredstva pozicionirovaniya i navigacii robotov v vodnoj srede [Methods and technical means of positioning and navigation of robots in the aquatic environment] // *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra RAN*. 2023. № 6(116). S. 167–178. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-167-178
3. Wang C., Li Z., Wang T., Xu X., Zhang X., Li D. Intelligent fish farm—the future of aquaculture. *Aquaculture International*, 2021, Vol. 29, pp 1-31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00773-8>
4. Fedorchenko E., Novikova E., Danilov A., Saenko I. Towards the Testbed and Dataset for Analysis of Water Treatment Systems Security. *Proceedings of the 4th International Conference on Data Science and Applications (ICDSA 2023)* – Malaviya National Institute of Technology Jaipur, India – July 14-15, 2023, Springer Nature Computer Science.
5. Froese R., Pauly D. *Fishbase*, 2010
6. FAO, *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020: Sustainability in Action*, The State of World Fisheries and Aquaculture (SOFIA), vol. 2020, FAO, Rome, Italy, 2020, <https://www.fao.org/documents/card/en/c/CA9229EN>

7. Vásquez-Quispesivana W., Inga M., Betalleluz-Pallardel I. Inteligencia artificial en acuicultura: fundamentos, aplicaciones y perspectivas futuras. *Scientia Agropecuaria*, 2022, Vol. 13(1), p. 79-96. DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.008>
8. Gong B., Dai K., Shao J., Jing L., Chen Y. Fish-TViT: A novel fish species classification method in multiwater areas based on transfer learning and vision transformer. *Heliyon*. 2023, Iss. 6, Vol. 9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16761>
9. Urbanova P., Bozhynov V., Cisar P., Zelezny M. Classification of fish species using silhouettes. *Bioinformatics and Biomedical Engineering*, Springer International Publishing, Cham, 2020, pp. 310–319.
10. Rauf H. T., Lali M. I. U., Zahoor S., Shah S. Z. H., Rehman A. U., Bukhari S. A. C. Visual features based automated identification of fish species using deep convolutional neural networks. *Computers and electronics in agriculture*. 2019, 105075, Vol. 167, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105075>
11. Xu X., Li W., Duan Q. Transfer learning and se-resnet152 networks-based for small-scale unbalanced fish species identification. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021, 105878, Vol. 180. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105878>
12. Cueto M. S., Diangkinay J. M. B., Melencion K. W. B., Senerado T. P., H. L. P. Taytay H. L. P., Tolentino E. R. E. Classification of Different Types of Koi Fish Using Convolutional Neural Network. 2021 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), 2021, pp. 1135-1142, doi: 10.1109/ICICCS51141.2021.9432358
13. Nayak K. K., Pradhan J., Das B. K. Original Research Article Characterization, pathogenicity, antibiotic sensitivity and immune response of *Flavobacterium columnare* isolated from *Cirrhinus mrigala* and *Carassius auratus*. *International journal of current microbiology and applied sciences*. 2014, Vol. 3, N. 11, pp. 273-287
14. Tacon A. G. J., Metian M. Fish Matters: Importance of Aquatic Foods in Human Nutrition and Global Food Supply. *Reviews in Fisheries Science*. 2013, Vol. 21(1), pp. 22–38. DOI: <https://doi.org/10.1080/10641262.2012.753405>
15. Ahmed M. S., Aurpa T. T., Azad M. A. K. Fish disease detection using image based machine learning technique in aquaculture. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2022, Vol. 34(8), P. 5170-5182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.05.003>
16. Rachman F., Akbar M. N. S., Putera E. Fish Disease Detection of Epizootic Ulcerative Syndrome Using Deep Learning Image Processing Technique. In *Proceedings International Conference on Fisheries and Aquaculture*, 2023, Vol. 8, No. 1, pp. 23-34, DOI: <https://doi.org/10.17501/23861282.2023.8102>
17. Sujatha K., Mounika P. Evaluation of ML Models for Detection and Prediction of Fish Diseases: A Case Study on Epizootic Ulcerative Syndrome. 2023 Second International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT). 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICEEICT56924.2023.10156914.
18. Li D., Li X., Wang Q., Hao Y. Advanced Techniques for the Intelligent Diagnosis of Fish Diseases: A Review. *Animals*, 2022, Vol. 12(21), pp. 2938. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani12212938>
19. Hasan N., Ibrahim S., Aqilah Azlan A. Fish diseases detection using convolutional neural network (CNN). *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, 2022, Vol. 13(1), pp. 1977-1984. DOI: 10.22075/IJNAA.2022.5839
20. Sarma K., Kumar A. A., George G., Pandian K., Prabakaran K., Roy S. D., Srivastava R. S. Impact of coastal pollution on biological and biochemical and nutritional status of edible oyster in Phoenix Bay Jetty and North Wandoor of Andaman. *Indian Journal of Animal Sciences*. 2013, N. 83, pp. 321-325.
21. Ogij O. G., Osipov V. Y., Tristanov A. B., Zhukova N. A. Tasks and performance indicators of intelligent neural network support for decisions on managing labor potential of the fishery complex (in english). *Marine intellectual technologies*. 2021. N. 4-4 (54). pp. 73-79. <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.010>
22. Chiu M. C., Yan W. M., Bhat S. A., Huang N. F. Development of smart aquaculture farm management system using IoT and AI-based surrogate models. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2022, Vol. 9, N. 100357. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100357>
23. Huan J., Li H., Wu F., Cao W. Design of water quality monitoring system for aquaculture ponds based on NB-IoT. *Aquacultural Engineering*. 2020, Vol. 90, N. 102088. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102088>
24. Islam M. M., Kashem M. A., Alyami S. A., Moni M. A. Monitoring water quality metrics of ponds with IoT sensors and machine learning to predict fish species survival. *Microprocessors and Microsystems*, 2023, Vol. 102, N. 104930. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2023.104930>
25. Shi B., Sreeram V., Zhao D., Duan S., Jiang J. A wireless sensor network-based monitoring system for freshwater fishpond aquaculture. *Biosystems Engineering*. 2018, Vol. 172, pp. 57-66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.05.016>
26. Ubina N. A., Lan H. Y., Cheng S. C., Chang C. C., Lin S. S., Zhang K. X., Lu H. Y., Cheng C. Y., Hsieh Y. Z. Digital twin-based intelligent fish farming with Artificial Intelligence Internet of Things (AloT). *Smart Agricultural Technology*. 2023, Vol. 5, N. 100285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100285>
27. Chahid A., N'Doye I., Majoris J. E., Berumen M. L., Laleg-Kirati T. M. Model predictive control paradigms for fish growth reference tracking in precision aquaculture. *Journal of Process Control*. 2021, Vol. 105, pp. 160-168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2021.07.015>
28. Ubina N., Cheng S. C., Chang C. C., Chen H. Y. Evaluating fish feeding intensity in aquaculture with convolutional neural networks. *Aquacultural Engineering*, 2021, Vol. 94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102178>
29. Mustapha U. F., Alhassan A.W., Jiang D. N., Li G. L. Sustainable aquaculture development: a review on the roles of cloud computing, internet of things and artificial intelligence (CIA). *Reviews in Aquaculture*, 2021, Vol. 13, pp. 2076-2091. DOI: <https://doi.org/10.1111/raq.12559>
30. Kongkeo H., Wayne C., Murdjani M., Bunliptanon P., Chien, T. Current practices of marine finfish cage culture in China, Indonesia, Thailand and Vietnam. *Aquaculture Asia*, 2010, 15(3)

31. Xu T. J., Dong G. H., Zhao Y. P., Li Y. C., Gui F. K. Analysis of hydrodynamic behaviors of gravity net cage in irregular waves. *Ocean engineering*, 2011, Vol. 38(13), pp. 1545-1554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.07.019>
32. Kristiansen T., Faltinsen O. M. Experimental and numerical study of an aquaculture net cage with floater in waves and current. *Journal of Fluids and Structures*, 2015, Vol. 54, pp. 1-26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2014.08.015>
33. Guo L., Li Z. Effects of nitrogen and phosphorus from fish cage-culture on the communities of a shallow lake in middle Yangtze River basin of China. *Aquaculture*, 2003, Vol. 226, pp. 201-212. DOI: 10.1016/S0044-8486(03)00476-9
34. Chen Y., Qiao J., Liu J., Zhao R., An D., Wei Y. Three-dimensional path following control system for net cage inspection using bionic robotic fish. *Information Processing in Agriculture*. 2022, Vol. 9, P. 100-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.12.002>
35. Wu Z., Liu J., Yu J., Fang H. Development of a Novel Robotic Dolphin and Its Application to Water Quality Monitoring. in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2017, vol. 22, N. 5, pp. 2130-2140. doi: 10.1109/TMECH.2017.2722009
36. Shin D., Na S. Y., Kim J. Y., Baek S. J. Fish Robots for Water Pollution Monitoring Using Ubiquitous Sensor Networks with Sonar Localization. 2007 International Conference on Convergence Information Technology (ICCIT 2007). 2007, pp. 1298-1303, doi: 10.1109/ICCIT.2007.391.
37. Luna F. D. V. B., de la Rosa Aguilar E., J. Suárez Naranjo J. S., Gutiérrez Jagüey J. Robotic System for Automation of Water Quality Monitoring and Feeding in Aquaculture Shadehouse. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, vol. 47, N. 7, pp. 1575-1589. doi: 10.1109/TSMC.2016.2635649.
38. Bekarev A., Ivashko E., Ivashko V. Aquaculture digitalization: Polling karelian fish farmers. *Agriculture Digitalization and Organic Production*. Springer. Smart Innovation, Systems and Technologies 2023. Vol. 362. pp. 363-372.
39. Razhev A. O., Nedostup A. A. Komp'yuternaja imitacija povedenija ryb v zamknutoj sisteme vodosnabzhenija [Computer simulation of fish behavior in a closed water supply system], *Morskie intellektual'nye tehnologii*. 2023. № 4 chast' 1, S. 277—284. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.033

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

Ле Ван Нгиа, специалист, Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия», 197045, Россия, Санкт-Петербург, Ушаковская набережная, 17/1, e-mail: Lenghia18071999@gmail.com

Van N. Le, Specialist's Degree, Military Research and Educational Center of the Navy "Naval Academy", 197045, Russia, St. Petersburg, 17/1, Ushakovskaya embankment; e-mail: lenghia18071999@gmail.com

Ронжин Андрей Леонидович, д-р техн. наук, профессор, директор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., 39, e-mail: ronzhin@iias.spb.su

Andrey L. Ronzhin, Dr. Sci. (Eng), Professor, Director, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), 199178, St. Petersburg, 14 line V.O., 39, e-mail: ronzhin@iias.spb.su

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 11.01.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 23.01.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 25.01.2024.

Научная статья

УДК 629.5.02; 614.842.6; 629.331

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.022>**Системные принципы обеспечения экологической безопасности транспортной системы Северного морского пути****Скороходов Д.А.**¹ skorohodda@mail.ru, **Маринов М.Л.**¹ marinlomsky@gmail.com,
Каминский В.Ю.¹ Kaminskyvy@yandex.ru¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. Активное промышленное освоение ресурсов Арктической зоны России ведет к усилению негативного воздействия на природную среду этого региона. Рост числа рейсов судов по Северному морскому пути (СМП), связанных с добычей углеводородного сырья и других полезных ископаемых, с доставкой грузов для снабжения северных районов страны, с арктическим туризмом и др., повышают риск загрязнения природной среды Арктики, которая сегодня менее загрязнена, чем другие регионы мира. Для транспортной системы (ТС) Северного морского пути характерны высокие риски при судоходстве из-за узких и мелководных проливов, сложных ледовых и погодных условий и т.д. На территории Арктической зоны России каждый год происходит более 100 чрезвычайных ситуаций, среди которых транспортные аварии – 30%, взрывы и пожары технологического оборудования – 24%. С целью снижения экологических рисков при мореплавании по СМП используются различные организационно-технические мероприятия и методы технического и технологического решения. В статье сформулированы принципы построения системы управления экологической безопасностью региона, координирующие деятельность органов управления различными видами транспорта. Реализация данных принципов позволит эффективно решать задачи обеспечения безопасного функционирования ТС СМП на всех этапах транспортного процесса: при перевозках грузов, их временном хранении и погрузочно-разгрузочных работах.

Ключевые слова: транспорт, морской, риски, безопасность, интенсификация, инфраструктура, система, воздействие, экология

Финансирование: работа выполнена в рамках исполнения государственного задания ИПТ РАН № 075-00602-24-0 на 2024 год и на плановый период 2025 и 2026 годов за счет средств предоставленной Минобрнауки России субсидии (Соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 18.01.2024 №075-03-2024-666).

Для цитирования: Скороходов Д.А., Маринов М.Л., Каминский В.Ю., Системные принципы обеспечения экологической безопасности транспортной системы Северного морского пути, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 181—190. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.022

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.022>**Systemic principles of ensuring environmental safety of the Northern Sea Route transport system****Dmitriy A. Skorokhodov**¹ skorohodda@mail.ru, **Marin L. Marinov**¹ marinlomsky@gmail.com,
Valery Yu. Kaminsky¹ Kaminskyvy@yandex.ru¹Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences

Abstract. The active industrial development of the resources of the Arctic zone of Russia leads to an increased negative impact on the natural environment of this region. The increase in the number of ship voyages along the Northern Sea Route (NSR) related to the extraction of hydrocarbons and other minerals, the delivery of goods to supply the northern regions of the country, Arctic tourism, etc., increase the risk of pollution of the Arctic environment, which today is less polluted than other regions of the world. The transport system (TC) of the Northern Sea Route is characterized by high risks in navigation due to narrow and shallow straits, difficult ice and weather conditions, etc. More than 100 emergencies occur on the territory of the Arctic zone of Russia every year, including transport accidents – 30%, explosions and fires of technological equipment – 24%. In order to reduce environmental risks during navigation on the NSR, various organizational and technical measures and methods of technical and technological solutions are used. The article formulates the principles of building an environmental safety management system in the region, coordinating the activities of management bodies of various modes of transport. The implementation of these principles will make it possible to effectively solve the tasks of ensuring the safe functioning of the NSR vehicle at all stages of the transport process: during the transportation of goods, their temporary storage and loading and unloading operations.

Keywords: transport, maritime, risks, safety, intensification, infrastructure, system, impact, ecology.

Financial Support: the work was carried out as part of the execution of the state task of the IPT RAS № 075-00602-24-0 for 2024 and for the planned period of 2025 and 2026 at the expense of the 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 18 January 2024 № 075-03-2024-666).

For citation: Dmitriy A. Skorohodov, Marin L. Marinov, Valery Yu. Kaminsky, Systemic principles of ensuring environmental safety of the Northern Sea Route transport system, Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 181—190. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.022

Введение

Арктический регион РФ привлекателен своими просторами и богатой сырьевой базой, что сообщает ему огромный потенциал для развития сегодня и в будущем. Многие задачи развития региона тесно связаны с необходимостью обеспечения устойчивого функционирования социотехнических систем в условиях хрупкой и уязвимой природы Арктики.

Северный морской путь (СМП) – это стержень, вокруг которого строится жизнь российской Арктики и с ним тесно связана интенсивность освоения ресурсов российского Севера. Заполярье особый регион, природно-климатические условия которого не располагают к возведению избыточного количества инфраструктурных объектов. Поэтому развитие его экономики будет связано напрямую с развитием его транспортной системы.

Политика государства направлена на поддержку дальнейшего освоения Арктики, интенсификацию перевозок, обеспечение повседневной деятельности транспортных предприятий и организаций, выполняющих работы в Арктике, обеспечение населения социально значимыми грузами, развитие транспортной и сопутствующей инфраструктуры [1].

Основные уровни, формирующие общегосударственную систему транспорта РФ

В настоящее время в Российской Федерации следует выделять, по крайней мере, четыре основных уровня, формирующих общегосударственную систему транспорта.

- 1) Единая транспортная система (ЕТС) Российской Федерации.
- 2) Региональные транспортные системы (РТС).
- 3) Транспортные системы субъектов Российской Федерации.
- 4) Транспортные системы отдельных территорий, входящих в состав субъектов Российской Федерации.

Взаимосвязь транспортных систем различного уровня представлена на рис. 1.

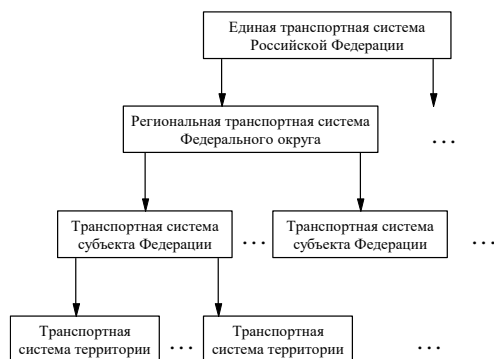


Рис. 1. Структура транспортной системы Российской Федерации

В общем случае под транспортной системой (ТС) понимается совокупность эффективно взаимодействующих видов транспорта, путей

сообщения и транспортных средств в совокупности с производственным и управленческим персоналом, обеспечивающим погрузочно-разгрузочные работы, перевозку пассажиров и грузов в целях наилучшего удовлетворения спроса на транспортные услуги населения и грузовладельцев.

Под единой транспортной системой понимается целостная отрасль хозяйственной деятельности Российской Федерации, включающая совокупность организаций и предприятий транспорта и транспортной инфраструктуры, независимо от их ведомственной принадлежности и форм собственности, действующих в едином правовом, экономическом и информационном пространстве и обеспечивающая перевозку (доставку) грузов и пассажиров, а также трудовые ресурсы и управляющие структуры отрасли различных уровней.

ЕТС формируется как совокупность региональных транспортных систем, каждая из которых включает в себя транспортные системы субъектов Федерации и территорий.

Под *региональной транспортной системой* понимается транспортная система, охватывающая группу субъектов Федерации, входящих в один из Федеральных округов. В настоящее время сформировано восемь Федеральных округов (Северо-Западный, Центральный, Южный, Северо-Кавказский, Уральский, Сибирский, Приволжский и Дальневосточный), каждый из которых объединяет ряд регионов имеющих территориальную, экономическую и транспортную общность.

Под *транспортной системой Субъекта Российской Федерации* понимается транспортная система самостоятельного Субъекта. В настоящее время в состав Российской Федерации входит 89 субъектов: национальных республик, областей и краев, автономных округов и два города (Москва и Санкт-Петербург).

Структура транспортной системы каждого из субъектов Федерации имеет свои специфические отличия, обусловленные географическими особенностями Субъекта, его экономическим развитием, структурой населения и др. В рамках экономики Российской Федерации транспортные системы следует рассматривать двояко. С одной стороны транспорт, выступает как часть инфраструктуры рынка товарных услуг, которая обслуживает различные отрасли хозяйственной деятельности (промышленность, сельское хозяйство). С другой стороны транспорт выступает как субъект рынка, продающий свои услуги по перемещению товаров и пассажиров. Кроме того, в современных условиях транспорт играет системообразующую роль и обеспечивает интеграцию различных территорий и регионов страны за счет обмена товарами и трудовыми ресурсами.

Транспортная система Субъектов Федерации может быть разделена на ТС территорий, входящих в состав Субъекта. Подобное разделение, как правило, имеет смысл для территорий с большой протяженностью транспортной сети, которая имеет определенную функциональную целостность.

Под *транспортной системой территории* понимается транспортная система, охватывающая одну или несколько административных территорий, входящих в состав Субъекта Федерации.

Функциональная структура транспортной системы северного морского пути (ТС СМП) обладает сложной внутренней организацией (рис.2).



Рис. 2. Обобщенный состав транспортной системы СМП

В составе транспортной системы выделим пять функциональных элементов:

- *транспорт* - совокупность транспортных предприятий различных форм собственности и частных лиц, владеющих различными видами транспортных средств и обеспечивающих предоставление транспортных услуг населению и грузовладельцам (в т.ч. транспортные средства индивидуального пользования);

- *коммуникации* - транспортная сеть (в т.ч. дороги и пути различного типа и назначения; инженерные коммуникации; средства автоматизации, управления и контроля), системы электроснабжения и связи, используемые как для обеспечения функционирования средств транспорта, так и для обеспечения функционирования транспортной инфраструктуры, трудовые ресурсы и органы управления;

- *инфраструктура* или *сфера услуг* - элементы, обеспечивающие функционирование средств транспорта (порты, сервисные центры, центры технического обслуживания и ремонта, центры снабжения ресурсами и др.) и реализующие транспортные услуги (погрузочно-разгрузочные комплексы; складские комплексы и хранилища; транспорт, обеспечивающий погрузочно-разгрузочный сервис и др.);

- *трудовые ресурсы* - совокупность определенным образом организованного и

квалифицированного персонала, занятого в предоставлении транспортных услуг, обслуживании или управлении работой транспортной отрасли, а также организационных структур, обеспечивающих эффективную деятельность персонала (центры подготовки и повышения квалификации; центры отдыха, питания) и выполнение персоналом производственных функций (транспортные предприятия, сервисные центры и пр.);

- *органы управления и контроля* - государственные и негосударственные органы и структуры, обеспечивающие реализацию функций управления, контроля, развития и модернизации ТС СМП в целом, различных ее элементов и их составляющих.

Потребителей транспортных услуг ТС СМП - грузовладельцев и пассажиров, можно рассматривать как специфический элемент транспортной системы, обуславливающий внутреннюю структуру ТС СМП и ее элементов, а также процессы, протекающие внутри ТС. Влияние потребителей транспортных услуг проявляется как напрямую - через доходы от перевозок, так и косвенно, через доходы от других элементов ТС СМП, получаемых в процессе оказания дополнительных услуг (ремонт, обеспечение топливом, погрузка/разгрузка и др.).

Целостность ТС СМП проявляется во взаимодействии всех элементов, формирующих рынок транспортных услуг: поставщиков услуг

транспортной инфраструктуры; системы управления транспортом; экономическую безопасность; информационную; антитеррористическую и экологическую безопасность.

Элементы экологической безопасности транспортной системы Северного морского пути

Экологическая безопасность (ЭБ) транспортной системы Северного морского пути – это безопасность для окружающей среды и населения. Экологическая безопасность предполагает анализ трех видов взаимодействия [3].

«Человек – техника» - взаимодействие внутри транспортной системы, характеризующее экологические и биологические аспекты влияния работы транспорта и сферы его обслуживания на людей, занятых в транспортной сфере.

«ТС (техника) – природа», характеризуется различными аспектами воздействия ТС на природную среду.

«ТС (техника) – население», характеризующее прямое воздействие ТС на население, проживающее на определенной территории.

Экологическая безопасность характеризуется:

- уровнем загрязнений (по видам веществ и физическим полям) - объемом вредных веществ (излучений), попадающих в природную среду в процессе нормального (штатного) функционирования ТС и ее элементов;
- экологическим ущербом, наносимым загрязнением территориям - суммой затрат, необходимых на проведение мероприятий по устранению негативных последствий;
- экологическим риском - вероятностью возникновения аварийных ситуаций, влияющих на состояние окружающей среды, или мерой опасности, характеризующей возможность возникновения аварии на производственном объекте и тяжесть ее последствий.

В настоящее время экологическая обстановка в районах расположения основных транспортных коммуникаций ухудшается. Это связано, в первую очередь, с существенным увеличением объема перевозок автомобильным транспортом, значительная часть которого не удовлетворяет требованиям к экологической безопасности.

Кроме того, при строительстве новых автотранспортных магистралей, а также при модернизации существующих, не всегда учитываются действующие экологические нормы и возможные экологические последствия, что приводит к повышению экологических рисков, появлению патогенных зон и росту социальной напряженности.

Изучение основ управления экологической безопасностью ТС [4] осуществляется на междисциплинарной основе и включает следующие базовые блоки: знания об естественных природных процессах в регионе с учетом опасных и особо опасных явлений; результаты экологических исследований в Арктике; методы обработки судов и технологии перегрузочных процессов в необорудованных пунктах Арктической зоны РФ, методы прогнозирования экологической безопасности судоходства и способы обеспечения безопасности плавания судов в условиях

арктических морей; методы защиты морей от загрязнения и методы утилизации отходов; методы правового регулирования морских операций и экологической безопасности.

По современным оценкам, в Арктике сосредоточено около 22 % мировых конвенциональных запасов нефти и газа и 28-30 % от мировых неразведанных запасов природного газа. Уже сегодня в российской Арктике осуществляется добыча около 80% газа и 60% нефти от совокупной добычи в стране. По оценкам, в Арктике находятся значительные запасы минеральных ресурсов: например, в регионе располагается около 11% мировых запасов кобальта, Арктика обеспечивает около 40% мировой добычи палладия, технических алмазов, около 15% мировой добычи платины.

Россия располагает абсолютным преимуществом по принадлежащим ей объемам арктических запасов всех вышеперечисленных ресурсов [5]. Именно в Арктике Россия добывает 90 % никеля и 60 % меди. Арктика богата и биологическими ресурсами: на территории Российской Федерации сосредоточено около 80 % всего арктического биоразнообразия.

Арктика обеспечивает около 11% национального дохода России и около 20% ВВП страны. При этом, на освоение арктических территорий оказывают влияние климатические условия, очаговый характер промышленно-хозяйственного освоения территорий, низкая плотность населения и удаленность от основных промышленных центров. Влияние оказывают также высокая ресурсоемкость, зависимость хозяйственной деятельности и жизнеобеспечения населения от поставок топлива, продовольствия и товаров первой необходимости из других регионов России, низкая устойчивость экологических систем, определяющих биологическое равновесие и климат Земли, и их зависимость даже от незначительных антропогенных воздействий.

Основными угрозами для экологии Арктической зоны России по маршрутам транспортной системы СМП являются:

- угрозы судоходству, связанные с экстремальными климатическими условиями, наличием ледовых полей и возникновением магнитных бурь;
- разливы нефти и нефтепродуктов, связанные с добычей нефти на материке и в море; транспортировкой нефти и нефтепродуктов; авариями при бункеровке и в ходе других судовых операций.
- сброс судовых отходов в море, связанный с эксплуатацией судов и грузовыми отходами;
- сброс нефтесодержащих и сточных вод;
- сброс мусора;
- замена судового балласта;
- выбросы в атмосферу загрязняющих веществ от судовых двигателей;
- шумовое загрязнение;
- брошенные поселки и мусорные свалки;
- влияние океанских морских течений, дополнительно приносящих загрязненные воды из других районов Мирового океана.

Загрязнение Арктики в целом и Арктической зоны России, в частности, имеет не только региональные (местные), но и глобальные причины, поэтому они не могут быть устранены только административными и техническими решениями какой-либо одной страны.

Отметим основные направления по снижению уровня загрязнений в Арктике:

- усовершенствование российской законодательной базы, регламентирующей деятельность в Арктической зоне России;
- укрепление международного сотрудничества и формирование международной законодательной базы, препятствующей загрязнению побережья Арктики и акватории с учетом интересов всех стран;
- развитие космических систем мониторинга источников загрязнения в Арктике и на СМП;
- совершенствование правил плавания судов в Арктике;
- развитие береговой портовой инфраструктуры по трассе СМП для обеспечения безопасности мореплавания;
- запрет на сброс с судов балластных вод, всех видов мусора, неизмельченных и необеззараженных сточных вод в особо важных районах Арктики;
- развитие портовой инфраструктуры для приема всех видов судовых отходов, а также отходов от ликвидации возможных аварийных разливов, и др.;
- создание для плавания в Арктике «экологически чистых» судов, обеспечивающих минимальные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу.

Обеспечение экологической безопасности в ТС СМП

Обеспечение экологической безопасности в ТС СМП включает следующие этапы [6].

1. Для безопасного функционирования ТС СМП необходимо обеспечить безопасность всех составляющих системы таким образом, чтобы каждая составляющая безопасности ТС СМП - H_i была максимальна или лежала в диапазоне допустимых значений:

$$\forall i \{H_i \rightarrow \max | H_i \in H_{\text{доп}}\} \Leftrightarrow H_{\text{ТС}} \in H_{\text{ТС}}^{\text{доп}},$$

где H_i – количественное значение комплексного показателя для отдельной составляющей безопасности (i – номер составляющей).

Таким образом, для обеспечения безопасности ТС СМП в целом требуется обеспечивать безопасность отдельных функциональных элементов системы, а также протекающих в системе транспортных, информационных и финансовых процессов.

2. Требуется внедрение на транспорте специализированных систем управления безопасностью.

Под *системой управления безопасностью* ТС СМП (СУБ) понимается комплексная организационно-техническая система, выполняющая функции анализа состояния, контроля и обеспечения безопасности, как отдельных функциональных элементов и процессов транспортной системы, так и системы в целом.

СУБ строится по иерархическому принципу, причем основные уровни иерархии соответствуют уровням иерархии Единой ТС РФ (см. рис. 1.). Каждый уровень иерархии СУБ, в свою очередь представляет собой иерархическую систему,

отражающую соподчиненность и взаимосвязь между функциональными элементами ТС СМП (см. рис. 2, 3).

3. В зависимости от особенностей задач обеспечения безопасности СУБ может быть реализована как:

- *организационная система*, в которой основным способом обеспечения безопасности является деятельность человека в рамках организационных мероприятий по обеспечению / поддержанию безопасности;
- *организационно-техническая система*, в которой безопасность частично реализуется за счет применения комплексов технических средств автоматизации процессов обеспечения безопасности, и, частично, за счет организационных мероприятий;
- *техническая система*, в которой обеспечение безопасности реализуется за счет применения комплексов технических средств автоматизации процессов обеспечения безопасности;

• *информационная система*, в которой выполняется анализ текущего состояния безопасности и поиск решений (советов и рекомендаций) по достижению заданного уровня безопасности. Реализация предложенных решений обеспечивается человеком посредством технических средств или организационных мероприятий.

4. Для решения задачи обеспечения безопасности ТС СМП и отдельных ее компонентов требуется разработать дерево целей системы управления безопасностью.

В общем система представляет собой иерархическую структуру с противоречивыми частными целями и критериями эффективности. Это обусловлено тем, что различные элементы ТС СМП (см. рис. 3) решают зачастую прямо противоположные задачи.

Таким образом, при рассмотрении ТС СМП, в частности, следует рассматривать совокупность критериев, каждый из которых описывает различные поведения участников рынка транспортных услуг (см. рис. 1.3), их предпочтения и стратегии поведения на рынке.

Анализ показывает, что для оценки различных аспектов функционирования ТС СМП целесообразно использовать следующие группы критериев:

- 1) *Функциональные критерии*, характеризующие удовлетворительность выполнения системой и ее элементами основных функциональных задач (перевозок).
- 2) *Экономические критерии*, характеризующие экономическую эффективность функционирования системы и ее элементов.
- 3) *Социальные критерии*, характеризующие различные социальные последствия функционирования системы и ее элементов.
- 4) *Экологические критерии*, характеризующие влияние системы и ее элементов на природную среду, жизнедеятельность человека, а также возможные экологические последствия развития системы.
- 5) *Информационные критерии*, характеризующие информационные процессы,

протекающие в системе и обеспечивающие адекватное и своевременное представление деятельности различных субъектов рынка транспортных услуг.

Системные принципы обеспечения экологической безопасности транспортной системы северного морского пути

При разработке системы управления безопасностью ТС СМП рекомендуется соблюдать следующие принципы [7,8].

1. Методологической основой создания системы управления безопасностью является системный подход. При проектировании системы управления риском и ее компонентов необходимо комплексное применение методов моделирования, методов системного анализа и системного синтеза.

2. СУБ является организационно-технической системой, ориентированной на обеспечение безопасности сложного технологического комплекса и снижение возможного ущерба от реализации потенциальных опасностей. Техническая структура обеспечивает обработку информации и принятие решений по снижению риска. Организационная структура обеспечивает реализацию мероприятий по управлению риском.

3. СУБ – специализированная информационно-управляющая система, интегрируемая в состав средств автоматизации технологического комплекса и имеющая тесное информационное взаимодействие с системами автоматического управления и контроля технологических процессов, системами диагностирования и системами материально-технического снабжения.

4. Комплекс средств автоматизации, в который входит СУБ, строится на основе принципов открытых систем, что подразумевает:

- создание единого информационного пространства, являющегося основой для функционирования всех систем комплекса автоматизации;
- применение технологии распределенных баз данных, обеспечивающей как совместное, так и автономное решение задач различными автоматизированными подсистемами, а также применение распределенного преобразования информации, позволяющее реализовать параллельное решение задач;
- применение технологий информационной поддержки жизненного цикла изделий (CALS-технологий) в части эксплуатации, ремонта, обслуживания и утилизации.

Основой указанных технологий являются технологии автоматизированных банков данных, технологии автоматизированного документооборота и сетевые технологии.

5. Для решения задач управления безопасностью необходимо использовать специализированные комплексы программных средств, которые обеспечивают информационное сопровождение процедур анализа и управление риском.

Анализ существующих проблем безопасности позволяет сформулировать ряд дополнительных принципов, которые должны быть реализованы при разработке системы управления безопасностью транспортной системы СМП.

1. Наличие регионального центра, решающего задачи стратегического планирования, прогнозирования, координации работы и развития различных отраслей транспорта Арктического региона. При этом, региональный центр является структурным подразделением Федеральных органов управления транспортом и тесно взаимодействует с органами власти и управления транспортом субъектов Федерации.

Региональный центр должен обеспечивать:

- прогнозирование развития ТС СМП и формирование предложений по развитию коммуникаций, инфраструктуры и сервиса;
- координацию развития транспортных систем субъектов Федерации с развитием ТС СМП;
- координацию взаимодействия транспортных систем и органов управления транспортом субъектов Федерации, согласование нормативных актов в области транспорта, действующих в различных субъектах Федерации и Федеральных законов;
- контроль за выполнением требований нормативных документов, за организацией управления движением и за работой транспортных узлов.

2. Наличие единого информационного пространства, охватывающего всех участников транспортного процесса, а также органов контроля и управления работой транспорта в рамках ТС СМП.

Под единым информационным пространством понимается общая для всех участников транспортного рынка совокупность способов хранения, обработки и представления данных, а также методов их обработки, которые обеспечивают решение основных задач, связанных с функционированием транспортных систем.

Анализ показывает, что в основе единого информационного пространства лежит технология распределенных баз данных и метод распределенного преобразования информации.

Под распределенным преобразованием информации понимается совокупность упорядоченных в пространстве и времени операций по целенаправленному преобразованию информации последовательно - параллельным способом в вычислительной системе с распределенными в пространстве взаимодействующими процессорами.

3. Создание распределенных систем мониторинга и дистанционного сбора информации о состоянии транспортных процессов, которые обеспечивают получение информации, необходимой для решения задач оперативного управления транспортными процессами в режиме реального времени, для прогнозирования развития ТС СМП, для экологического, таможенного и налогового контроля.

Средством реализации указанных принципов должна выступать региональная автоматизированная система (АС) по управлению безопасностью на транспорте.

Для эффективного обеспечения процедур управления безопасностью ТС СМП необходимо применение специализированных АС. В основе создания подобных АС лежат технологии распределенных банков данных и распределенного преобразования информации, которые обеспечивают решение функциональных задач

различных подсистем АС. Для каждой подсистемы АС структура организации данных идентична, а структура и состав используемого информационного, алгоритмического и программного обеспечения изменяется в зависимости от решаемых задач.

На рис. 4 представлена обобщенная структура региональной системы управления безопасностью на транспорте.

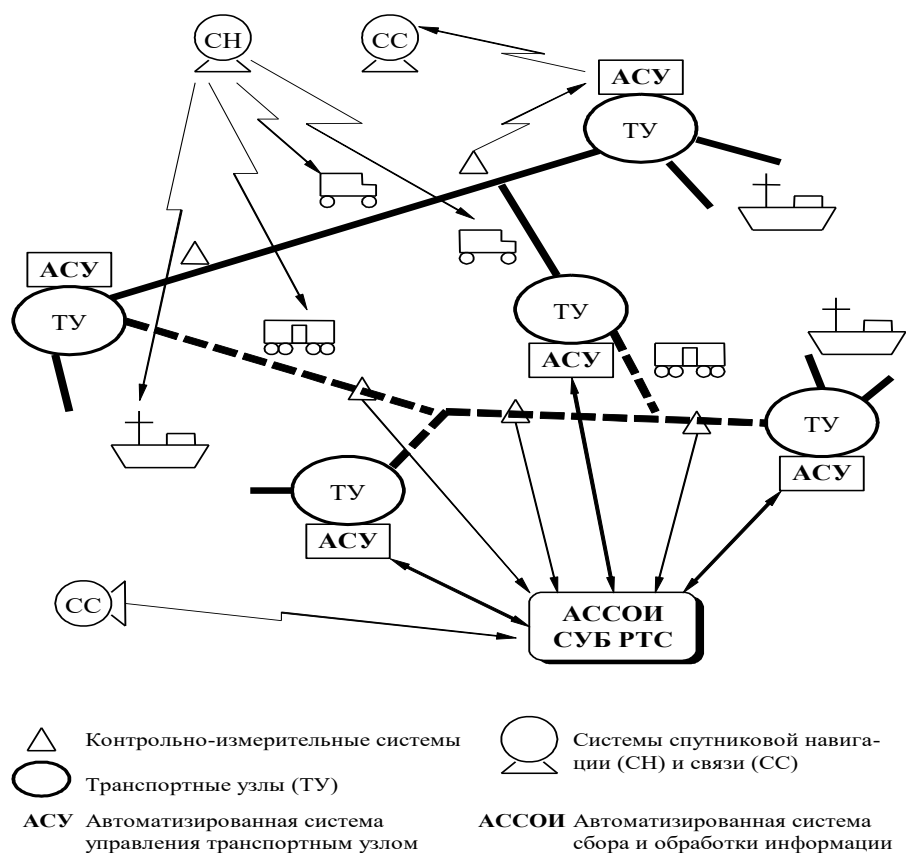


Рис. 4. Обобщенная структура региональной автоматизированной системы управления транспортом

Обобщенная структура региональной системы управления безопасностью на транспорте, включает в себя:

- автоматизированные системы управления транспортными узлами (АСУ ТУ), решающие задачи управления транспортным узлом (ТУ), формирования и контроля за прохождением маршрута;

- локальные системы мониторинга (контрольно-измерительные системы), обеспечивающие автоматизированный или автоматический сбор и передачу информации о характеристиках транспортных процессов (плотность потока, скорость движения, интенсивность движения и др.), прохождении грузов и транспортных средств, метеоусловиях (температура, влажность, наличие осадков, видимость, состояние дорожного покрытия и др.), экологической обстановке (наличие вредных примесей, токсичных и радиоактивных веществ и др.) и т.д.

- системы связи (спутниковые, радио - и кабельной связи), обеспечивающие передачу информации между элементами региональной системы управления транспортом;

- системы спутниковой навигации, обеспечивающие определение местоположения транспортных средств, передачу их координат в АСУ

ТУ, определение параметров движения транспортных средств.

Современные информационные технологии, аппаратные и программные средства позволяют построить распределенную автоматизированную систему сбора и обработки информации (АССОИ) практически любой сложности.

Разработка и внедрение подобной системы обеспечит решение ряда проблем ТС СМП, в частности, система позволит:

- существенно повысить точность долго -, средне - и краткосрочного прогнозирования транспортных потребностей субъектов Федерации и характеристик транспортной ТС СМП;

- повысить эффективность оперативного управления за счет рациональной организации схем движения транспорта с учетом реальной загрузки коммуникаций, их фактического технического состояния и погодных условий;

- сократить транспортные издержки перевозчиков за счет рациональной организации транспортных потоков;

- обеспечить оптимизацию структуры ТС СМП за счет рационального использования имеющихся финансовых ресурсов (инвестиций);

- упростить процедуры таможенного и налогового контроля за счет автоматизации документооборота и возможности контроля за движением груза;
- обеспечить возможность контроля за транспортировкой грузов, в т.ч. за перевозкой ценных и опасных грузов;
- обеспечить оперативный контроль за экологической обстановкой на коммуникациях, в транспортных узлах.

Предлагаемые принципы к построению системы управления экологической безопасностью региона позволят обеспечить координированную деятельность органов управления различными видами транспорта. Это создаст условия для эффективного решения задач обеспечения безопасного функционирования ТС СМП на всех этапах транспортного процесса: при перевозках грузов, их временном хранении и погрузочно-разгрузочных работах.

Литература

1. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А., Васьков В.Т. Теоретические основы оптимального наблюдения параметров работы объектов инфраструктуры Арктического региона и Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3-1(61). С. 163-169.
2. Построение интеллектуальных сетей мониторинга и управления экологической безопасностью Арктического региона и Северного морского пути / Скороходов Д.А., Каминский В.Ю., Дюк В.А., Королёв О.А., Бордученко Ю.Л. СПб.: СПбУ ГПС МЧС России, ИПТ РАН, 2023. - 303 с.
3. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А., Кузнецова Е.Ю. Оценка экологической безопасности водной транспортировки грузов // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3-1(57). С. 212-219.
4. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А. Информационное обеспечение безопасности объектов инфраструктуры Арктического региона и Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4-1(62). С. 179-188.
5. Бордученко Ю.Л., Малыгин И.Г., Каминский В.Ю., Аксёнов В.А. Атомный ледокольный флот России в первой четверти XXI века. Задачи и перспективы освоения Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-1(52). С. 14-25.
6. Гурлев И.В., Макоско А.А., Малыгин И.Г., Каминский В.Ю. Интеллектуализация транспортной системы Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 3-1(53). С. 228-235.
7. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А., Стариленков А. Л., Никитин Н. В. Имитационная модель оценки безопасности водного транспорта // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 4-1(54). С. 20-27.
8. Скороходов Д. А., Степанов И. В., Турусов С. Н., Никитин Н. В. Применение инструментов анализа рисков при создании решающих правил систем поддержки принятия решений // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3-3 (45). С. 114-120.

References

1. Kaminsky V. Yu., Skorohodov D. A., Vas'kov V.T. Teoreticheskie osnovy optimal'nogo nablyudeniya parametrov raboty ob"ektov infrastruktury Arkticheskogo regiona i Severnogo morskogo puti [Theoretical foundations of optimal monitoring of the parameters of the infrastructure of the Arctic region and the Northern Sea Route] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2023. № 3-1(61). pp. 163-169.
2. Postroenie intellektual'nyh setej monitoringa i upravleniya ekologicheskoy bezopasnost'yu Arkticheskogo regiona i Severnogo morskogo puti [Building intelligent networks for monitoring and managing environmental safety in the Arctic region and the Northern Sea Route] / Skorohodov D.A., Kaminsky V. Yu., Dyuk V.A., Korolyov O.A., Borduchenko Yu.L. SPb.: SPbu GPS MCHS Rossii, IPT RAN, 2023. - 303 p.
3. Kaminsky V. Yu., Skorohodov D. A., Kuznecova E.Yu. Ocenka ekologicheskoy bezopasnosti vodnoj transportirovki грузов [Assessment of environmental safety of water transportation of goods] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2022. № 3-1(57). pp. 212-219.
4. Kaminsky V. Yu., Skorohodov D. A. Informacionnoe obespechenie bezopasnosti ob"ektov infrastruktury Arkticheskogo regiona i Severnogo morskogo puti [Information security of infrastructure facilities in the Arctic region and the Northern Sea Route] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2023. № 4-1(62). pp. 179-188.
5. .Borduchenko YU.L., Malygin I.G., Kaminsky V. Yu., Aksyonov V.A. Atomnyj ledokol'nyj flot Rossii v pervoj chetverti xxi veka. zadachi i perspektivy osvoeniya Severnogo morskogo puti [The nuclear icebreaking fleet of Russia in the first quarter of the XXI century. tasks and prospects for the development of the Northern Sea Route] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. № 2-1(52). pp. 14-25.
6. Gurlev I.V., Makosko A.A., Malygin I.G., Kaminsky V. Yu. Intellektualizaciya transportnoj sistemy Severnogo morskogo puti [Intellectualization of the transport system of the Northern Sea Route] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. № 3-1(53). pp. 228-235.
7. Kaminsky V. Yu., Skorohodov D. A., Starichenkov A. L., Nikitin N. V. Imitacionnaya model' ocenki bezopasnosti vodnogo transporta [Simulation model for assessing the safety of water transport] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. № 4-1(54). pp. 20-27.
8. Skorohodov D. A., Stepanov I. V., Turusov S. N., Nikitin N. V. Primenenie instrumentov analiza riskov pri sozdani reshayushchih pravil sistem podderzhki prinyatiya reshenij [The use of risk analysis tools in creating decisive rules for decision support systems] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 3-3 (45). pp. 114-120.

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

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

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

Каминский Валерий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Valery Yu. Kaminsky, assistant professor, PhD (Eng), Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 04.02.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 11.02.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 22.02.2024.

Научная статья

УДК 62-50

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.023>

Управление вертикальным движением автономного ныряющего буя в поле гидростатического давления океанской стратифицированной среды

Краснодубец Л.А.¹ lakrasno@gmail.com, Конева С.А.¹ ksa@mail.ru, Цалоев В.М.¹ 1._@mail.ru¹Севастопольский государственный университет

Аннотация. Ставится и решается задача проектирования адаптивной системы терминального управления автономным ныряющим буюм (АНБ), предназначенным для сбора данных в океанской среде во время свободного дрейфа на заданном горизонте гидростатического давления, на основе предложенной барической модели динамики его вертикального движения в стратифицированной водной среде. Процедуры синтеза и моделирования реализованы в среде MATLAB & Simulink в виде программ и S-моделей. Результаты проектирования представлены в виде графиков переходных процессов, совершаемых автономным ныряющим буюм при переходе из начального состояния на океанской поверхности в конечное терминальное состояние, соответствующее заданному горизонту гидростатического давления. При этом в общем нестационарной океанской среде замена пространственной переменной «глубины» гидростатическим давлением позволило избежать ошибок при определении расстояний из-за эффекта сжатия морской воды, а также упростить структуру измерительного канала в контуре обратной связи системы управления положением АНБ при его движении в поле гидростатического давления океанской среды.

Ключевые слова: адаптивная система, терминальное управление, гидростатическое давление, ныряющий буй, динамическая модель, электропривод, адаптивный регулятор, синтез, эталонная модель.

Финансирование: Исследование выполнено в порядке личной инициативы без финансирования.

Для цитирования: Краснодубец Л.А., Конева С.А., Цалоев В.М. Управление вертикальным движением автономного ныряющего буя в поле гидростатического давления океанской стратифицированной среды, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 191—198. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.023

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.023>

The vertical movement control of an autonomous diving buoy in the hydrostatic pressure field of an ocean stratified environment

Leonid A. Krasnodubets¹ lakrasno@gmail.com, Svetlana A. Koneva¹ ksa@mail.ru,Vladimir M. Tsalojev¹ 1._@mail.ru¹Sevastopol state University

Abstract. The problem of designing an adaptive terminal control system for an autonomous diving buoy (ADB), designed to collect data in the ocean environment during free drift at a given hydrostatic pressure horizon, is posed and solved, based on the proposed pressure model of the dynamics of its vertical movement in a stratified seawater environment. Synthesis and modeling procedures are implemented in the MATLAB & Simulink environment in the form of programs and S-models. The design results are presented in the form of graphs of transient processes performed by an autonomous diving buoy during the transition from the initial state on the ocean surface to the final terminal state corresponding to a given hydrostatic pressure horizon. At the same time, in the general non-stationary ocean environment, replacing the spatial variable “depth” with hydrostatic pressure made it possible to avoid errors in determining distances due to the effect of compression of seawater, as well as to simplify the structure of the measuring channel in the feedback loop of the ADB position control system when it moves in a hydrostatic pressure field ocean environment.

Keywords: adaptive system, terminal control, hydrostatic pressure, diving buoy, dynamic model, electric drive, adaptive controller, synthesis, reference model.

Financial Support: The research was carried out as a personal initiative without funding.

For citation: Leonid A. Krasnodubets, Svetlana A. Koneva, Vladimir M. Tsalojev, The vertical movement control of an autonomous diving buoy in the hydrostatic pressure field of an ocean stratified environment. Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 191—198. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.023

Введение

Основным компонентом современной глобальной системы наблюдения за океаном (GOOS) являются морские свободно плавающие (дрейфующие) автономные поплавки с батарейным электропитанием класса Argo [1], которые часто называют автономными ныряющими буями (АНБ). Такие буи используются для сбора данных как в

режиме вертикального зондирования, так и во время свободного дрейфа вместе с морским течением в поле гидростатического давления. При этом под полем гидростатического давления в океане понимается пространственное распределение величины давления в точке, зависящего от её удаления по нормали до плоскости поверхности.

Особенностью АНБ, выпускаемых несколькими производителями, является наличие в их составе

регуляторов плавучести, с помощью которых они могут совершать управляемые вертикальные перемещения (погружаться и всплывать) или зафиксироваться в океанской толще с нулевой плавучестью.

Управление вертикальным движением АНБ в стратифицированной океанской среде имеет ряд особенностей. Вертикальная стратификация вод океанской среды проявляется в результате образования на различных глубинах горизонтальных слоёв морской воды с одинаковой плотностью. Эти водные слои в океане могут иметь различную толщину (от десятков сантиметров до сотен метров) и значительную протяжённость до сотен километров. При этом вертикальная структура океанской среды может на длительное или короткое время оставаться неизменной [2]. Если для вертикального перемещения АНБ используется регулятор (вариатор) плавучести, формирующий управляющее воздействие в виде составляющей силы Архимеда, которая зависит от текущей плотности окружающей морской воды, то в таком случае движение по вертикали будет сопровождаться скачкообразными возмущениями, вызванными изменением плотности морской воды и, как следствие, ухудшением качества управления.

Другая особенность проявляется в том, что для определения глубины погружения, выраженной в метрах, приходится использовать данные измерений гидростатического давления в окружающей океанской среде, выраженные в соответствующих физических единицах измерения, с помощью установленного на борту датчика и корректирующей приближённой формулы. Например, в [3] приведена формула коррекции для определения глубины через давление в виде

$$z = 0,9919p - 0,2121p^2 \cdot 10^{-5},$$

где гидростатическое давление p выражено в мегапаскалях [МПа], а глубина z в метрах [м].

Более точный результат можно получить при использовании модели «стандартного океана» и Международного уравнения состояния морской воды [4] с помощью формулы [5]

$$z = \left[100 - (5,92 + 5,25 \sin^2 \varphi) \cdot 10^{-1} \right] p - 2,21 \cdot 10^{-2} p^2,$$

где p – гидростатическое давление [МПа];

Z – глубина [м]; φ – географическая широта места океанографической станции [рад].

Известна так же формула для определения глубины Z по гидростатическому p давлению и широте φ для «стандартного» Чёрного моря [6]. В работе [7] приводится детальный обзор способов определения глубин погружения океанографических приборов и подводных аппаратов по измерениям гидростатического давления.

Очевидно, что точность определения (достижения заданной глубины) будет зависеть от выбранного способа и применяемого инструментария, а также от сжимаемости морской воды. Отказ от использования понятия «глубина» в пользу понятия «гидростатическое давление» позволит повысить точность позиционирования вне зависимости от сжатия морской воды. Например, в современной океанологии основные характеристики

вертикальной стратификации вод океанской среды принято выражать как функции гидростатического давления. Аналогичным образом поступают разработчики поплавков Argo связывая их вертикальное позиционирование в океанской толще с гидростатическим давлением. Если учесть сжимаемость морской воды, то такая замена глубины как вертикальной координаты Z имеет преимущества и с физической точки зрения [8].

Целью статьи является повышение точности вертикального позиционирования АНБ в процессе его управляемого вертикального движения в стратифицированной океанской среде при выходе на заданный горизонт океанской толщи с нулевой вертикальной скоростью для последующего сбора данных при дрейфе вдоль линии заданной изобары.

1. Модель морского АНБ как объекта управления в поле гидростатического давления в условиях стратифицированной океанской среды

Будем рассматривать морской АНБ в качестве подвижной платформы сбора данных – поплавкового устройства с корпусом цилиндрической формы, объём которого состоит из двух частей – базового $V_0^0 = \text{const}$ и камеры плавучести как неотъемлемой части общего цилиндрического корпуса АНБ, объём которой V_{kn} может изменяться при помощи регулятора (вариатора) плавучести [1]. Особенностью такого устройства является способность менять плавучесть в заданных пределах относительно нейтрального значения. При этом управляющая сила (сила Архимеда) возникает в результате приращения объёма корпусной части за счёт изменения объёма камеры плавучести, текущее значение которого определяется соотношением

$$V_{kn}(t) = l(t)S_c,$$

где $l(t)$ – длина штока вариатора плавучести;

S_c – площадь сечения камеры плавучести;

$$0 \leq l(t) \leq l^{\max} \text{ и } 0 \leq V_{kn}(t) \leq V_{kn}^{\max}. \quad (1)$$

Принимая во внимание (1), сделаем допущение, что конструкция корпусной части такова, что АНБ будет обладать нейтральной плавучестью, если $V_{kn}(t) = V_{kn}^{\max} / 2$. В этом случае неравенство (1) для $l(t)$ примет вид

$$-l^{\max} / 2 \leq l(t) \leq l^{\max} / 2. \quad (2)$$

Далее будем считать, что изменение объёма $V_{kn}(t)$ выполняет электромеханический вариатор плавучести, уравнение которого в замкнутом состоянии имеет следующий вид:

$$\dot{l}(t) = -T_{ed}^{-1}l(t) + k_{ed}T_{ed}^{-1}u(t), \quad (3)$$

$$t = t_0; l(t_0) = 0; t \in [t_0, t_f],$$

где k_{ed} – коэффициент передачи вариатора;

T_{ed} – постоянная времени вариатора плавучести;

$u(t)$ – управляющее воздействие (напряжение).

Математические модели вертикального движения АНБ с регулируемой плавучестью в стратифицированной океанской среде получены в

форме дифференциальных уравнений относительно глубины Z в [9] и приведены в следующем модифицированном виде.

Уравнение процесса погружения

$$\ddot{z}(t) = -a\dot{z}(t)^2 - bgl(t) + fg, \quad t \in [t_0, t_f], \quad (4)$$

$$t_0 = 0; \quad z(t_0) = 0; \quad \dot{z}(t_0) = 0; \quad l(t_0) < 0.$$

Уравнение процесса всплытия

$$\ddot{z}(t) = a\dot{z}(t)^2 - bgl(t) + fg, \quad t \in [t_0, t_f], \quad (5)$$

$$t_0 = 0; \quad z(t_0) = z_0; \quad \dot{z}(t_0) = \dot{z}_0; \quad l(t_0) > 0,$$

где $z(t)$ – текущая глубина; $l(t)$ – перемещение штока вариатора плавучести;

g – ускорение свободного падения на широте местоположения АНБ;

$a = C_x S / 2V_0^0$ и $b = S / V_0^0$ – конструктивные параметры корпусной части АНБ;

C_x – коэффициент лобового сопротивления корпуса;

S – площадь сечения корпуса ($S = S_c$);

$f = \rho^0 / \rho(z)$ – коэффициент, характеризующий влияние плотности морской воды на вертикальную составляющую ускорения АНБ; $\rho(z) = \rho^0 + \Delta\rho(z)$ – плотность морской воды как функция глубины; ρ^0 – среднее значение плотности морской воды в океане на широте φ местоположения АНБ; $\Delta\rho(z)$ – приращение плотности морской воды.

К уравнениям (4) и (5) следует добавить (3) и (2).

Построенная система нелинейных дифференциальных уравнений и неравенств вместе с соответствующими начальными условиями представляет собой математическую модель АНБ с регулируемой плавучестью, которая описывает динамику его вертикального движения в зависимости от глубины $z(t)$ при погружении и всплытии в стратифицированной океанской среде при задании функции $\rho(z)$, характеризующей распределение плотности морской воды по глубине и функции управления $u(t)$, а также ускорения g .

Плотность морской воды в зависимости от времени, региона и глубины изменяется. Эти изменения во времени носят чаще всего сезонный характер. Однако, в зависимости от глубины положения и вертикальной скорости АНБ они вследствие вертикальной стратификации вод океанской среды могут происходить быстро и многократно за время одного погружения АНБ, выполняющего, например, профильные измерения. При этом с ростом глубины вследствие эффекта сжатия начинает проявляться зависимость плотности морской воды и от гидростатического давления. Это так же влияет на точность позиционирования АНБ при глубоководных исследованиях. Поэтому при проектировании системы автоматического управления глубоководным аппаратом будем рассматривать динамику его движения и позиционирование в океанской среде в поле гидростатического давления.

Поставим задачу преобразования построенной «глубинной» модели (4) к виду, удобному для описания динамических процессов вертикального движения АНБ в поле гидростатического давления в

условиях стратифицированной океанской среды, находящейся в равновесном невозмущённом состоянии. В таком случае решение этой задачи можно выполнить при помощи основного уравнения гидростатики, связывающего гидростатическое давление $p(z)$ на глубине z с вертикальным профилем плотности $\rho(z)$ морской воды и ускорением свободного падения $g(\varphi, z)$, зависящим от широты φ местоположения АНБ и глубины Z , которое имеет вид

$$p(z) = p_a + \int_0^z g(\varphi, z) \rho(z) dz, \quad (6)$$

где p_a – атмосферное давление.

Рассмотрим разность двух гидростатических давлений p_1 и p_2 , на соответствующих горизонтах океанской толщи, которые последовательно проходит АНБ при вертикальном перемещении с учётом основного уравнения гидростатики (6), а также малой зависимости ускорения $g(\varphi, z)$ от географической широты φ и глубины z . Имеем

$$\begin{aligned} \Delta p = p_2 - p_1 &= g \int_0^{z_2} \rho(z) dz - g \int_0^{z_1} \rho(z) dz = \\ &= g \int_{z_1}^{z_2} \rho(z) dz = g(z_2 - z_1) \bar{\rho}(z) = g \Delta z \bar{\rho}(z). \end{aligned} \quad (7)$$

Из (7) следует

$$\Delta p / \Delta z = g \bar{\rho}(z), \quad (8)$$

где Δz – перемещение АНБ по глубине от горизонта с давлением p_1 к горизонту с давлением p_2 ;

$\bar{\rho}(z)$ – средняя плотность морской воды между двумя изобарическими слоями; g – ускорение свободного падения для географической широты местоположения АНБ.

При стремлении Δz к нулю можно перейти от конечных разностей в (8) к полной производной гидростатического давления:

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} [\Delta p / \Delta z = g \bar{\rho}(z)]. \quad (9)$$

Полагая в (9) $\bar{\rho}(z) = \rho^0$, имеем

$$dp/dz = g \rho^0 \quad (10)$$

Далее, разделив числитель и знаменатель в (10) на dt , найдём выражения для производных $\dot{z}$ и $\ddot{z}$ глубины z через производные $\dot{p}$ и $\ddot{p}$ гидростатического давления p . Имеем

$$\dot{z} = \dot{p} / g \rho^0, \quad \ddot{z} = \ddot{p} / g \rho^0. \quad (11)$$

Выполняя подстановку выражений (11) в уравнения (4) и (5) с заменой $G = g \rho^0$, можно преобразовать «глубинную» модель динамики вертикального движения АНБ в соответствующую «барическую» модель, которая принимает следующий вид:

уравнение процесса погружения

$$\ddot{p}(t) = -[a/G] \dot{p}(t)^2 - bGgl(t) + fGg, \quad (12)$$

$$t_0 = 0; p(t_0) = p_0; \dot{p}(t_0) = 0; l(t_0) < 0; t \in [t_0, t_f];$$

уравнение процесса всплытия

$$\ddot{p}(t) = [a/G]\dot{p}(t)^2 - bGgl(t) + fGg, \quad (13)$$

$$t_0 = 0; p(t_0) = p_{\max}; \dot{p}(t_0) = 0; l(t_0) > 0; t \in [t_0, t_f],$$

где $p(t)$ – текущее гидростатическое давление;

$l(t)$ – перемещение штока вариатора плавучести;

g – ускорение свободного падения на географической широте φ местоположения АНБ;

$$f = \rho^0 / \rho(p).$$

Уравнения (12) и (13) вместе с (3) и (2), а также соответствующими начальными условиями описывают процессы вертикального движения АНБ как объекта управления с регулируемой плавучестью в поле гидростатического давления в условиях стратифицированной океанской среды.

2. Закон управления для вывода АНБ на заданный горизонт гидростатического давления с нулевой скоростью и за требуемое время

Пусть математическая модель морского АНБ как объекта управления с регулируемой плавучестью, представлена нелинейным дифференциальным уравнением (12) и уравнением (3) электропривода с начальными условиями, неравенством (2), а также ограничениями на управляющую функцию $u(t)$, которые следуют из (1).

Поскольку рассматриваемая модель АНБ является существенно нелинейной, то, исключая традиционные подходы для организации искомого управления, поставим задачу об адаптивном управлении с эталонной моделью: найти управление $u(t, p, \dot{p})$ в форме обратной связи, которое обеспечит перевод АНБ из начального состояния (12), соответствующего его неподвижному положению на поверхности в точке гидрографической станции, расположенной на широте φ , в конечное состояние стационарного равновесия $p(t) = \bar{p}$; $\dot{p}(t) = 0$ на подводном горизонте, соответствующем заданному гидростатическому давлению $\bar{p}$. При этом время достижения конечного состояния t_f так же должно быть задано.

Далее потребуем, чтобы процессы $p(t) \rightarrow \bar{p}$; $\dot{p}(t) \rightarrow 0$ в замкнутой системе

$$\ddot{p}(t) = -[a/G]\dot{p}(t)^2 - bGgu(t, p, \dot{p}) + fGg \quad (14)$$

$$t = t_f; p(t_f) = \bar{p}; \dot{p}(t_f) = 0$$

проходили в малой окрестности эталонных процессов $p^*(t) \rightarrow \bar{p}$; $\dot{p}^*(t) \rightarrow 0$, формируемых эталонной моделью

$$\ddot{p}^*(t) + \alpha_1 \dot{p}^*(t) + \alpha_0 p(t) = \alpha_0 \bar{p}, \quad (15)$$

определяющей желаемые свойства проектируемой системы управления вертикальным движением АНБ, а также время перехода из начального состояния в конечное, что соответствует терминальному управлению [10]. Выбор эталонной модели в виде (15) обусловлен порядком уравнения (12). Степень приближения эталонных процессов к процессам в

управляемой системе будем оценивать значением функционала [11]

$$G(u) = 0,5[\ddot{p}^*(t) - \ddot{p}(t, u)]^2, t \geq 0. \quad (16)$$

Функционал (16) при такой постановке служит одновременно критерием управления и целевым условием адаптации. При этом в роли физически реализуемого аргумента функционала выступает текущее значение функции управления.

Решение поставленной задачи выполним следующим образом. Пусть начальное состояние 'эталонной модели (15) в точности соответствует начальному состоянию объекта (14), а степень приближения управляемых и эталонных процессов в системе и в эталонной модели оценивается значением функционала (16) в ходе функционирования системы автоматического управления (локальная оптимизация).

В соответствии с градиентным методом отыскания $\min G(u)$ уравнение для вычисления оптимального управления примет вид

$$\frac{du(t)}{dt} = -\lambda \frac{\partial G(u)}{\partial u}, \quad (17)$$

где $\lambda = \text{const}$ – характеризует скорость, с которой управление $u(t, p, \dot{p})$ приближается к оптимальному значению u_{opt} .

Вычисляя производную $\partial G(u) / \partial u$ при помощи (16) и подставляя полученный результат в (17), получаем уравнение, определяющее искомым закон управления в дифференциальной форме

$$\dot{u}(t) = -\lambda b_0 [\alpha_0 (\bar{p} - p^*) - \alpha_1 \dot{p}^* - \ddot{p}], \quad (18)$$

где p^* и $\dot{p}^*$ – переменные эталонной модели.

Заменой $p^* = p$ и $\dot{p}^* = \dot{p}$ в (18) этих переменных соответствующими переменными, поступающими от объекта управления, формируются обратные связи. Далее путём интегрирования при нулевых начальных условиях обеих частей модифицированного уравнения получаем выражение для искомого закона управления в виде

$$u(t) = -\lambda b_0 \left[\alpha_0 \int_0^t (\bar{p} - p) dt - \alpha_1 p - \dot{p} \right] =$$

$$= -K \left[\alpha_0 \int_0^t (\bar{p} - p) dt - \alpha_1 p - \dot{p} \right] \quad (19)$$

Далее, используя (19), строим структурную схему адаптивного регулятора, изображённую на рис. 1.

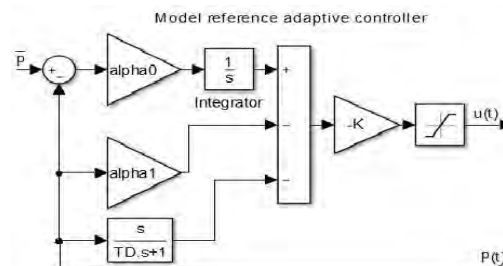


Рис. 1. Структурная схема адаптивного регулятора с неявной эталонной моделью

3. Синтез параметров адаптивного терминального регулятора

Задача синтеза адаптивного терминального регулятора решается в соответствии с методикой [11], которая сводится к вычислению коэффициентов неявной эталонной модели (15), а также параметра настройки K . Для решения этой задачи требуется задание только одной величины – терминального времени t_f , которая используется для определения коэффициентов эталонной модели α_0 и α_1 по формулам, следующим из канонической формы записи дифференциального уравнения колебательного звена, следующим образом. Сначала находится обобщённая постоянная времени колебательного звена τ , соответствующая постоянной времени процесса терминального управления по формуле

$$\tau = t_f / 7.$$

Далее выбирается коэффициент затухания ξ из условий требуемого перерегулирования σ :

если $\sigma \leq 5\%$, то $\xi = 0,707$;

если $\sigma = 0$, то $\xi = 0,9$.

Искомые коэффициенты эталонной модели (15) находятся с помощью следующих соотношений:

$$\alpha_0 = 1/\tau^2; \alpha_1 = 2\xi/\tau.$$

Начальное значение параметра K настройки адаптивного регулятора определяется по формуле

$$K \approx 30/bt_f, \quad (20)$$

где b – параметр объекта управления (12).

На практике (при моделировании или испытаниях) следует устанавливать начальное значение параметра настройки K , определённое по формуле (20), а далее экспериментально довести его до уровня, обеспечивающего требуемые показатели качества, определяемые по соответствующей переходной характеристике. При этом следует иметь в виду, что, как показано в [11], параметр настройки K адаптивного регулятора можно теоретически выбирать сколь угодно большим при сохранении устойчивости замкнутой системы управления.

Как следует из рис. 1, структура синтезированного А регулятора по своему составу напоминает структуру традиционного ПИД регулятора. При этом вместо идеального дифференцирующего звена, в соответствии с рекомендациями [12], введено реальное дифференцирующее устройство с постоянной времени T_D , значение которой зависит от величины выбранного шага численного интегрирования в процессе моделирования в среде Simulink.

4. Компьютерное моделирование

Компьютерное моделирование выполнено в среде MATLAB & Simulink. На рис. 2 приведена S-модель системы терминального управления с А регулятором, предназначенная для исследования

процесса погружения АНБ с регулируемой плавучестью в стратифицированной океанской среде с выходом на заданный горизонт гидростатического давления с нулевой скоростью за требуемое время.

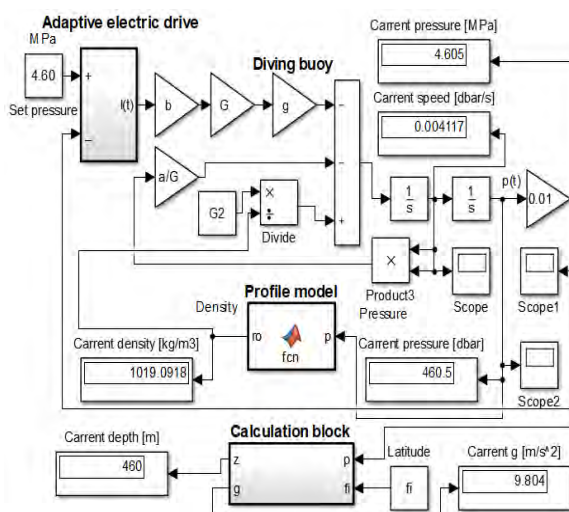


Рис. 2. Структурная схема (S-модель) процесса погружения АНБ на заданный горизонт гидростатического давления

На схеме моделирования (S-модели) приняты следующие обозначения:

Adaptive electric drive – адаптивный электропривод, предназначенный для управления погружением АНБ посредством устройства регулируемой плавучести (вариатора);

Diving buoy – АНБ;

Profile model – модель вертикального профиля плотности морской воды как функции давления (для района Чёрного моря);

Calculation block – вычислительный блок для определения по данным гидростатического давления текущих значений глубины погружения и ускорения свободного падения по известным соответствующим формулам;

a и **b** параметры математической модели (12) или (13), зависящие от конструкции корпуса АНБ;

g – ускорение свободного падения на географической широте **fi** местоположения АНБ;

$$G = ro_0 * g \text{ и } G2 = G^2, \text{ где } ro_0 = \rho^0.$$

Адаптивный электропривод состоит из А регулятора, схема модели которого приведена на рис. 1, и вариатора плавучести, представленного дифференциальным уравнением (3).

Исходные данные для моделирования:

$$\rho^0 = 1017,6950 \text{ кг/м}^3; \varphi = 44^\circ; k_{ed} = 100 \text{ м/В}; T_{ed} = 0,01 \text{ с}; a = 9,667 \text{ м}^{-1}; b = 2 \text{ м}^{-1}.$$

Параметры a и b определены для АНБ с цилиндрической формой корпуса диаметром $d_0 = 0,12 \text{ м}$ и длиной $L = 0,5 \text{ м}$, а также с кольцом стабилизации диаметром $d_r = 0,2 \text{ м}$ при коэффициенте лобового сопротивления $C_x = 0,87$.

Начальные значения глубины погружения и гидростатического давления, а также их производных принимаются нулевыми:

$$t = t_0; z(t_0) = 0; p(t_0) = 0; \dot{z}(t_0) = 0; \dot{p}(t_0) = 0.$$

Конечное терминальное состояние АНБ на заданном горизонте гидростатического давления характеризуется соотношениями:

$$t_f = 320 \text{ с}; p(t_f) = 460 \text{ МПа}; \dot{p}(t_f) = 0 \text{ МПа/с}.$$

5. Обсуждение результатов

Планом моделирования предусматривалось исследование процессов погружения АНБ при помощи адаптивных систем терминального управления, построенных на базе «барической» (12) и «глубинной» (4) моделей.

Результаты моделирования «барической» системы представлены в виде графиков, приведенных на рис. 3 и рис. 4, где соответственно показаны кривые изменения гидростатического давления, связанного с местоположением АНБ и вертикальной скоростью его перемещения при переходе из начального состояния в конечное терминальное состояние, а также в виде окон дисплеев, расположенных на графической форме S-модели на рис. 2, где в цифровом виде показаны текущие в ходе моделирования значения гидростатического давления и скорости его изменения, глубины от океанской поверхности и плотности окружающей АНБ морской воды.

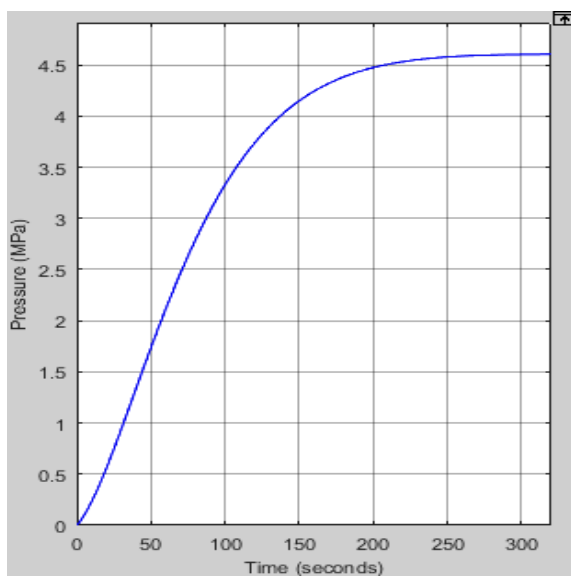


Рис. 3. График процесса погружения АНБ на заданный горизонт гидростатического давления

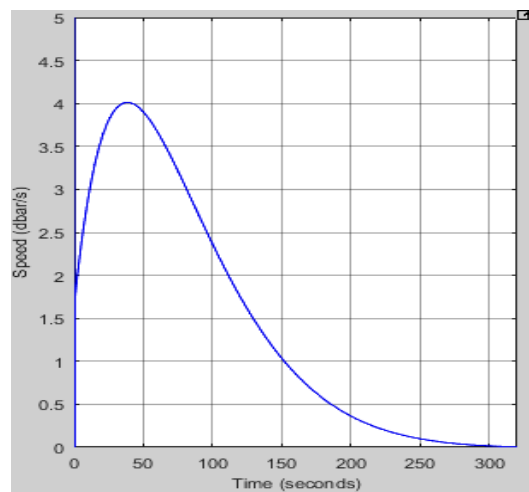


Рис. 4. График скорости погружения АНБ на заданный горизонт гидростатического давления

Как следует из приведенных графиков, а также показаний цифровых дисплеев на рис. 2, АНБ приходит в терминальное состояние практически с нулевой скоростью на горизонт гидростатического давления 4,605 МПа (при задании 4,6 МПа) за требуемое время 320 с. Погрешность составила 0,005 МПа (0,5 дбар) или 0.1%. При этом глубина погружения в метрах, вычисленная с помощью формулы [5] по гидростатическому давлению, выраженному в МПа, получила значение 460 м. Это согласуется с принятой в океанологии практикой считать гидростатическое давление в некоторой точке океанской толщи, выраженное в децибарах, численно равным удалению этой точки по нормали от океанской поверхности, выраженному в метрах.

В ходе моделирования наблюдалось изменение ускорения свободного падения от $g = 9,805$ до $9,804$ [м/с²], которое вычислялось по текущим расчётным значениям z при $\varphi = 44^\circ$ (0,7679 рад) с помощью формулы [13]

$$g = 9,780318(1 + 0,005302\sin^2 \varphi - 0,000006\sin^2 \varphi - 0,000003086z).$$

Результаты моделирования «глубинной» системы характеризуются описанием её терминального состояния в следующем виде:

$$t_f = 320 \text{ с}; z = 459,2 \text{ м}; v_z = 0,02 \text{ м/с}; g = 9,804 \text{ м/с}^2.$$

При этом погрешность при заданной глубине погружения 460 м составила 0,8 м или 0,002% в предположении, что применялись прямые измерения глубины z , например, с помощью локальной системы позиционирования.

Заключение

Применение «барической» модели (12) для синтеза адаптивной системы терминального управления вертикальным перемещением АНБ в стратифицированной океанской среде позволяет упростить структуру системы управления положением АНБ за счёт использования в канале обратной связи только одного датчика давления.

Литература

1. <https://www.aoml.noaa.gov/argo>, дата доступа 14.01.2024.
2. Федоров К.Н. Тонкая термохалинная структура вод океана. Л., Гидрометеиздат, 1976, 184 с.
3. Парамонов А.Н., Кушнир В.М., Заикин В.М. Автоматизация гидрофизического эксперимента. Л., Гидрометеиздат, 1982, 224 с.
4. IOC, SCOR and IAPSO, 2010. The international thermodynamic equation of seawater 2010, Calculation and use of thermodynamic properties. International Oceanographic Commission, Manuals and Guides, №56, UNESCO, 196 p.
5. Saunders P.M. Practical conversion of pressure to depth. J. Phys., Oceanogr., 1981, 11, P. 573–574.
6. Забурдаев В.И., Гайский П.В. Практические формулы взаимосвязи давления и глубины в Чёрном море. МГЖ, 2002, №6, С. 36–43.
7. Гайский В.А. Метод определения глубины погружения прибора в море при зондировании. Системы контроля окружающей среды, 2022, № 4, С. 40–45.
8. Мамаев О.И. Морская турбулентность. М., Изд-во МГУ, 1970, 204с.
9. Красnodубец Л.А., Забурдаев В.И., Альчаков В.В. Управление морскими буями-профилемерами как метод повышения репрезентативности термохалинных измерений. Модели движения. Морской гидрофизический журнал, 2012, № 4, С. 69–79.
10. Крутько П.Д. Алгоритмы терминального управления. Изв., РАН, Т и СУ, 1998, №6.
11. Красnodубец Л.А., Забурдаев В. И., Альчаков В. В. Управление морскими буями-профилемерами как метод повышения репрезентативности термохалинных измерений. Синтез и моделирование системы управления. Морской гидрофизический журнал, 2012, №5. С. 70-82.
12. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб., Изд-во «Корона-Век», 2014, 368 с.
13. Грушинский Н. П. Гравиметрия. Физическая энциклопедия, Гл. ред. А.М. Прохоров, М., Советская энциклопедия, 1988, Т.1, 707с.

References

1. <https://www.aoml.noaa.gov/argo>, дата доступа 14.01.2024.
2. Fedorov K.N. Tonkaya termokhalinnaya struktura vod okeana [**Thin thermohaline structure of ocean waters**]. L., Gidrometeoizdat, 1976, 184 s.
3. Paramonov A.N., Kushnir V.M., Zaikin V.M. Avtomatizatsiya gidrofizicheskogo eksperimenta [**Automation of the hydrophysical experiment**]. L., Gidrometeoizdat, 1982, 224 s.
4. IOC, SCOR and IAPSO, 2010. The international thermodynamic equation of seawater 2010, Calculation and use of thermodynamic properties. International Oceanographic Commission, Manuals and Guides, No.56, UNESCO, 196 p.
5. Saunders P.M. Practical conversion of pressure to depth. J. Phys., Oceanogr., 1981, 11, P. 573–574.
6. Zaburdayev V.I., Gayskiy P.V. Prakticheskiye formuly vzaimosvyazi davleniya i glubiny v Chornom more [**Practical formulas for the relationship between pressure and depth in the Black Sea**]. MGZH, 2002, №6, S. 36–43.
7. Gayskiy V.A. Metod opredeleniya glubiny pogruzheniya pribora v more pri zondirovanii [**Method for determining the depth of immersion of the device in the sea during sounding**]. Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy, 2022, № 4, S. 40–45.
8. Mamayev O.I., Morskaya turbulentnost [**Sea turbulence**]. M., Izd-vo MGU, 1970, 204s.
9. Krasnodubets L.A., Zaburdayev V.I., Al'chakov V.V. Upravleniye morskimi buyami-profilemerami kak metod povysheniya reprezentativnosti termokhalinnykh izmereniy, Modeli dvizheniya [**Management of marine profiler buoys as a method of increasing the representativeness of thermohaline measurements. Movement models**]. Morskoy gidrofizicheskoy zhurnal, 2012, № 4, S. 69–79.
10. Krut'ko P.D. Algoritmy terminal'nogo upravleniya [**Terminal control algorithms**]. Izv., RAN, T i SU, 1998, №6.
11. Krasnodubets L.A., Zaburdayev V. I., Al'chakov V. V. Upravleniye morskimi buyami-profilemerami kak metod povysheniya reprezentativnosti termokhalinnykh izmereniy. Sintez i modelirovaniye sistemy upravleniya [**Management of marine profiler buoys as a method of increasing the representativeness of thermohaline measurements. Synthesis and modeling of the control system**]. Morskoy gidrofizicheskoy zhurnal, 2012, №5, S. 70-82.
12. German-Galkin S.G. Matlab & Simulink. Proektirovanie mehatronnykh sistem na PK [**Designing mechatronic systems on a PC**]. SPb., Izd-vo «Korona-Vek», 2014, 368 s.
13. Grushinskiy N. P. Gravimetriya. Fizicheskaya entsiklopediya [**Gravimetry. The Physical Encyclopedia**]. Gl. red. A.M. Prokhorov., M., Sovetskaya entsiklopediya, 1988, T.1, 707s.

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

Краснодубец Леонид Андреевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовое электрооборудование, Севастопольский государственный университет 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, главный научный сотрудник Института природно-технических систем, 299011, Севастополь, ул. Ленина, 28, e-mail: lakrasno@gmail.com

Leonid A. Krasnodubets, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department ship's electric equipment, Sevastopol State University, Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, Chief Researcher of the Institute of Natural and Technical Systems, Lenin St., 28, Sevastopol, 299011, Russian Federation. e-mail: lakrasno@gmail.com

Конева Светлана Андреевна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой судовое электрооборудование, Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: ksa@mail.ru

Svetlana A. Koneva, Ph.D.(Eng.), Assistant professor, Head of the Department ship's electric equipment, Sevastopol State University, Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: ksa@mail.ru

Цалоев Владимир Муратович, доцент кафедры судовое электрооборудование, Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: 1._@mail.ru

Vladimir M. Tsaloev, Assistant professor of the Department ship's electric equipment, Sevastopol State University, Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: 1._@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 28.01.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 21.02.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 27.02.2024.

Обзорная статья

УДК 681.883.45

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.024>**Гидроакустический модем СПбГМТУ – сравнение с конкурентами**Тузова А.А.¹ tuzova.smtu@yandex.ru, Кузнецов А.Г.¹ andky@inbox.ru, Назаров А.М.¹ nazarovmail@yandex.ru,
Захарьева О.В.¹ science@SMTU.RU, Блинков А.П.¹ Blinkov@SMTU.RU¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В работе проведен обзор наиболее популярных гидроакустических модемов, использующихся робототехническими комплексами для передачи полезной информации под водой. Рассмотрены модемы зарубежных производителей (EvoLogics, DSPComm, Teledyne Benthos, Water Linked и др.) и российских производителей (AQUATELE.COM, UC&NL, СПбГМТУ). К каждому представленному в работе модему приведены его основные характеристики: рабочая дальность, полоса используемых частот, скорость передачи данных, потребляемая мощность в режимах приема и излучения и габаритные размеры устройства. На основе одной из важнейших характеристик модемов – рабочей дальности – проведено условное разделение всех рассмотренных устройств на три группы: модемы ближнего радиуса действия (до 1000 м), среднего радиуса действия (от 1000 до 3500 м) и дальнего радиуса действия (от 3500 м). В каждой из трех групп проведен сравнительный анализ модемов по трем характеристикам: скорости передачи данных, потребляемой мощности при излучении и массе устройства. По результатам сравнительного анализа был сделан вывод, что устройства, производимые в СПбГМТУ, сопоставимы по характеристикам с другими популярными моделями различных производителей, охватывают большой диапазон рабочих дальностей и могут составить конкуренцию модемам уже устоявшихся производителей.

Ключевые слова: гидроакустика, модем, OFDM, DSSS, подводный, сравнительный анализ, передача данных, прием данных, БПФ, ОБПФ

Для цитирования: Тузова А.А., Кузнецов А.Г., Назаров А.М., Захарьева О.В., Блинков А.П. Гидроакустический модем СПбГМТУ – сравнение с конкурентами, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 199—208. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.024

Review article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.024>**Hydroacoustic modem of SMTU - comparison with competitors**Anna A. Tuzova¹ tuzova.smtu@yandex.ru, Andrei G. Kuznetsov¹ andky@inbox.ru,
Andrei M. Nazarov¹ nazarovmail@yandex.ru, Ol'ga V. Zahar'eva¹ science@SMTU.RU,
Aleksey P. Blinkov¹ Blinkov@SMTU.RU¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. This work includes systematization and comparative analysis of the most popular hydroacoustic modems. Hydroacoustic modems are used in robotic complexes to transmit useful information underwater. Modems from foreign manufacturers (EvoLogics, DSPComm, Teledyne Benthos, Water Linked, etc.) and Russian manufacturers (AQUATELE.COM, UC&NL, SMTU) are considered. The main characteristics of each modem are presented: range, frequency band, data transfer rate, power consumption in reception and transmission modes, and weight of the device. A conditional division of all devices into three groups according to operating range was carried out: short-range modems (up to 1000 m), medium-range modems (from 1000 to 3500 m) and long-range modems (from 3500 m). In each of the three groups, a comparative analysis of modems was carried out according to three characteristics: data transfer rate, power consumption in transmission mode weight of the device. Based on the results of a comparative analysis, it was concluded that SMTU devices are comparable to other popular models, can operate over a long distance and can compete with devices from other manufacturers.

Key words: hydroacoustics, modem, OFDM, DSSS, underwater, comparative analysis, data transmission, data reception, FFT, IFFT

For citation: Anna A. Tuzova, Andrei G. Kuznetsov, Andrei M. Nazarov, Ol'ga V. Zahar'eva, Aleksey P. Blinkov, Hydroacoustic modem of SMTU - comparison with competitors, Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 199—208. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.024

Введение

В настоящее время актуальной задачей является исследование акваторий морей и океанов. Такие исследования включают в себя, например, долговременное наблюдение и мониторинг; поисковые работы по обнаружению технических и природных объектов; океанологические и экологические измерения; поиск источников

экологических загрязнений и т.д. [1]. Для выполнения задач такого типа активно используются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) [2], для управления которыми необходима надежная подводная беспроводная система передачи данных, а именно – гидроакустический (ГА) модем [3].

На рынке ГА устройств представлены модемы многих фирм, как зарубежных, так и отечественных [4], в том числе модем, разработанный в Санкт-

Петербургском государственном морском техническом университете (СПбГМТУ). Целью данной статьи является сравнительный анализ наиболее востребованных на рынке модемов и представление экспериментальных результатов работы модема, разработанного в СПбГМТУ.

Для сравнения модемов между собой используются основные технические характеристики: дальность действия D , скорость передачи данных r , полоса частот используемых сигналов B , потребляемая мощность в режиме приема P_{rx} и режиме передачи P_{tx} и масса m (или габаритные размеры s) устройства [3].

1. Особенности цифровой гидроакустической связи

Передача информации под водой является нетривиальной задачей. Использование радиоволн и оптических методов для передачи информации возможны только на небольших расстояниях (единицы метров для радиоволн и десятки метров для световых волн) из-за сильного затухания в воде. Таким образом, наибольшим преимуществом по дистанции обладает ГА связь, с помощью которой можно передавать информацию на десятки километров [5].

Однако создание ГА систем передачи информации осложняется множеством специфических эффектов ГА канала, таких как: ограниченная полоса возможных рабочих частот, большие задержки распространения сигнала (скорость звука в воде составляет примерно 1500 м/с), реверберация, замирания сигнала из-за многолучевого распространения, большие доплеровские сдвиги, быстрая изменчивость ГА среды, связанная с погодными условиями, и др. [6].

Подобные эффекты в среде распространения сигнала усложняют разработку таких ГА систем связи, которые бы работали одинаково эффективно в акваториях с различными условиями. Чтобы улучшить положение, обычно используются следующие методы или их комбинации [7-9]:

- использование ГА сигналов с различными типами модуляций, способных улучшить помехоустойчивость и противостоять многолучевости;
- управление доступом к среде с учетом особенностей распространения ГА сигнала;
- сетевая маршрутизация данных с учетом многолучевости и временной изменчивости среды распространения. (дискуссия).

2. Обзор гидроакустических модемов

2.1. Зарубежный рынок гидроакустических модемов

Ниже приведем основных производителей ГА устройств и описание их модемов. Следует отметить, что производители чаще всего указывают максимально достигаемую скорость передачи информации в ГА канале, близком к идеальному (т.е. при отношении сигнал шум много больше единицы), однако реальные условия могут быть разнообразны, и фактическая скорость может быть намного ниже заявленной.

2.1.1. EvoLogics [10]

Подводные ГА модемы EvoLogics обеспечивают полнодуплексную цифровую связь с использованием запатентованной технологии EvoLogics S2C (Sweep-Spread Carrier). Как заверяют производитель, алгоритмы настраивают параметры S2C так, чтобы была возможность поддерживать максимально возможную скорость передачи данных в текущих условиях среды. В модемах EvoLogics реализованы алгоритмы доставки данных, поддержки адресации и работы в сети, встроена коррекция ошибок и сжатие данных, также модемы можно конфигурировать с помощью заданного набора команд. Все модемы производителя совместимы с системами позиционирования с ультракороткой базой (УКБ) и с длинной базой (ДБ) от EvoLogics и могут быть использованы для одновременной связи и навигации.

В таблице 1 представлены основные устройства EvoLogics и их заявленные параметры. На рис. 1 представлен внешний вид устройств.

Таблица 1

Модемы компании EvoLogics

Параметр	R48/78	R18/34	R12/24	R7/17
D , м	1000	3500	6000	8000
B , кГц	48-78	18-34	13-24	7-17
r , кбит/с	до 31.2	до 13.9	до 9.2	до 6.9
P_{tx} , Вт	0.8	0.8	0.8	0.8
P_{rx} , Вт	60	65	57	45
m , г	2250	2245	2990	4700



Рис. 1 Внешний вид модемов EvoLogics

2.1.2. DSPComm [11]

Основными устройствами компании являются модемы Aquacom и Aquacom Gen2. Это подводные беспроводные модемы, созданные на основе алгоритмов связи с расширенным спектром. Основой модемов является энергоэффективный DSP, обеспечивающий широкий динамический диапазон и гибкость для повышения производительности. Производитель заявляет, что его модемы признаны наиболее надежным за время многолетних испытаний и коммерческого использования, а также что они работают практически в любых условиях реальных акваторий. В таблице 2 представлены основные технические характеристики модемов. На рис. 2 представлен внешний вид электронных модулей.

Таблица 2

Модемы компании DSPComm

Параметр	Aquascomm	Aquascomm Gen2
D , м	5000	8000
B , кГц	16-30	16-30
r , кбит/с	до 0.48	до 1.0
$P_{\text{вх}}$, Вт	2.4	6.0
$P_{\text{рх}}$, Вт	24	60
s , см	8×7×1.5	10×7×2



Aquascomm



Aquascomm Gen2

Рис. 2 Внешний вид электронных модулей DSPComm

2.1.3. Teledyne Benthos [12]

Компания Teledyne Benthos производит ГА модемы, широко используемые по всему миру для беспроводной передачи данных под водой. Устройства Benthos рассчитаны на различную скорость передачи данных в зависимости от выбранного модема и могут удовлетворить потребность либо в высокоскоростной, либо в высоконадежной передаче данных. Основная линейка модемов компании – это модемы серии ATM. Каждый из модемов имеет три возможных полосы частот для использования на различных дальностях и с различными скоростями передачи данных. Технические характеристики модемов представлены в таблице 3. Все модемы серии выполнены в двух вариантах: со встроенной батареей и с внешним питанием, в таблице 3 представлена масса и внешний вид модемов с внешним питанием. На рис.3 представлен внешний вид модемов.

Таблица 3

Модемы компании Teledyne Benthos

Параметр	ATM-910 Series	ATM-920 Series	ATM-960 Series
D , м	от 2000 для высоких частот; от 4000 для средних частот; от 6000 для низких частот		
B , кГц	9-14 (низкие частоты); 16-21 (средние частоты); 22-27 (высокие частоты)		
r , кбит/с	0.08 (MFSK); 0.14–2.4 (FHSS); 2.65–15.36 (PSK)		
$P_{\text{вх}}$, Вт	0.72		
$P_{\text{рх}}$, Вт	60		
m , г	5400	4100	7300



ATM-910 Series

ATM-920 Series

ATM-960 Series

Рис. 3 Внешний вид модемов Teledyne Benthos

Основное отличие модемов серии ATM в рабочих глубинах: для ATM-910 рабочая глубина составляет 500 м, для ATM-920 – 2000 м и для ATM-960 – 6000 м соответственно.

2.1.4. Water Linked [13]

Подводные ГА модемы EvoLogics обеспечивают Water Linked производит модемы, работающие в ближней зоне, но при этом имеющие небольшие габариты. Основные изделия компании – модем M64 и модем M16.

Модем M16 обеспечивает надежную ГА связь между двумя подводными объектами со скоростью 64 бит/с. Производитель утверждает, что его модем может работать и гарантировать надежную передачу данных практически в любых, даже самых сложных, ГА условиях. Также упоминается, что M64 настраивается пользователем, что позволяет легко интегрировать модем в любую систему.

Модем M16 загружается менее чем за 10 миллисекунд, потребляет менее 0.3 Вт в режиме прослушивания и имеет 12 каналов, что позволяет одновременно работать нескольким модемам в одной и той же зоне. Отличительной особенностью модема являются предельно малые габариты.

Технические характеристики модемов представлены в таблице 4. Внешний вид модемов представлен на рис. 4.

Таблица 4

Модемы компании Water Linked

Параметр	Aquascomm	Aquascomm Gen2
D , м	M16	M64
B , кГц	500	200
r , кбит/с	54.6-62.4	31-250
$P_{\text{вх}}$, Вт	0.016	0.064
$P_{\text{рх}}$, Вт	0.3	2.6
m , г	2	не указано



M16

M64

Рис. 4 Внешний вид модемов Water Linked

2.1.5. Sonardyne [14]

Компания Sonardyne производит линейку ГА модемов Modem 6. Подводные устройства Modem 6 поддерживают безопасную беспроводную передачу данных на скоростях от 200 до 9000 бит/с. Модемы предназначены для простых задач по передаче данных, например, их можно использовать для передачи сигналов позиционирования, данных со встроенных датчиков или телеметрии. Параметры модемов Modem 6 представлены в таблице 5. Внешний вид модемов представлен на рис. 5.

Таблица 5

Модемы компании Sonardyne

Параметр	Modem 6 Sub-Mini	Modem 6 Mini	Modem 6 Standard
D , м	1000	3000	5000
B , кГц	20-34	20-34	20-34
r , кбит/с	0.2-9	0.2-9	0.2-9
P_{tx} , Вт	не указано		
P_{rx} , Вт	не указано		
m , г	3200	5100	23800



Рис. 5 Внешний вид модемов Sonardyne

2.1.6. L3HARRIS [15]

Акустический модем GPM 300 может использоваться для надежной отправки и получения данных и/или голоса через воду для связи, мониторинга и дистанционного управления и контроля в суровых, многолучевых, реверберирующих и шумных гидроакустических средах, где другие модемы выходят из строя.

В модеме используется многоканальная технология MASQ третьего поколения с расширенным спектром прямой последовательности (DSSS), обеспечивающая высокую надежность связи и устойчивость к многолучевым межсимвольным помехам. Чтобы компенсировать замирание канала и многолучевые помехи, GPM 300 предлагает непрерывную коррекцию канала.

Технические характеристики модема представлены в таблице 6. Внешний вид модема представлен на рис. 6.

Таблица 6

Модем компании L3HARRIS

Параметр	GPM 300
D , м	45000* – теоретическая;
B , кГц	18000 – фактическая
r , кбит/с	6.5-16.5
P_{tx} , Вт	0.01-1
P_{rx} , Вт	1.8
m , г	300

* производитель приводит теоретические данные по максимальной рабочей дистанции модема при идеальных гидрологических условиях.

2.1.7. LinkQuest [16]

Обширная линейка высокоскоростных подводных акустических модемов SoundLink компании LinkQuest основана на технологии широкополосного акустического расширения спектра. Производитель утверждает, что его устройства отвечают следующим критериям:

- скорость передачи данных до 38,5 кбит/с;
- коэффициент битовых ошибок менее 10^{-9} ;
- очень низкое энергопотребление.

Параметры модемов SoundLink представлены в таблице 7. Внешний вид модемов представлен на рис. 7.

Таблица 7

Модемы компании LinkQuest

Параметр	UWM 1000	UWM 2000	UWM 3000	UWM 4000	UWM 10000
D , м	350	1500	3000	4000	10000
B , кГц	26.77-44.62	26.77-44.62	7.5-12.5	12.5-21.25	7.5-12.5
r , кбит/с	9.6-19.2	9.6-19.2	2.5-5.0	4.8-9.6	2.5-5.0
P_{tx} , Вт	0.75	0.8	0.8	0.8	0.9
P_{rx} , Вт	2	8	3-12	7	40
m , г	4200	4800	4100	7600	21000



Рис. 7 Внешний вид модемов LinkQuest

2.2. Российский рынок гидроакустических модемов

Ниже перечислены основные представители, производящие ГА модемы в России.

2.2.1. AQUATELE.COM [17]

Компания занимается разработкой систем подводной связи и навигации. Как утверждается на сайте, в устройствах компании используются алгоритмы, позволяющие работать в сложных ГА условиях с интенсивными шумами и множественными переотражениями. Параметры модемов AQUATELE.COM представлены в таблице 8. Внешний вид устройств представлен на рис. 8.

Таблица 8
Модемы компании AQUATELE.COM

Параметр	ATM-120EM	ATM-280EM	ATM-28
D , м	3500	15000	3500
B , кГц	24-32	10-14	24-32
r , кбит/с	4.0	1.7	4.0
P_{tx} , Вт	3	3	3
P_{rx} , Вт	35	60	35
s , см	12×6×3.5		Ø10×20



ATM-120EM/ATM-280EM

ATM-28

Рис. 8 Внешний вид модемов AQUATELE.COM

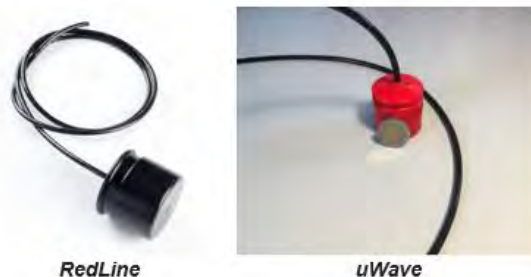
2.2.2. UC&NL [18]

Основные модемы компании: модем дальней связи RedLine и микромодем uWave. RedLine предназначен для передачи данных по ГА каналу, в том числе в сложных гидрологических условиях и в условиях мелководья. uWave, как утверждает производитель, самый маленький в мире гидроакустический модем. Параметры модемов UC&NL представлены в таблице 9. Внешний вид модемов представлен на рис. 9.

Таблица 9

Модемы компании UC&NL

Параметр	RedLine	uWave
D , м	8000	1000
B , кГц	5-15	10-30
r , кбит/с	0.08	0.078
P_{tx} , Вт	0.4	0.33
P_{rx} , Вт	10	6
s , см	Ø6.4×6.2	Ø4.1×4.5



RedLine

uWave

Рис. 9 Внешний вид модемов UC&NL

2.2.3. СПбГМТУ

В Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете (СПбГМТУ) производятся различные виды ГА устройств, в том числе и ГА модемы с различными характеристиками. Отличительная особенность разработки состоит в индивидуальном подходе к каждой задаче и адаптации существующих решений так, чтобы заданные характеристики выполнялись в полной мере. При этом все производимые устройства подчиняются единому стандарту взаимодействия и могут быть использованы в комплексе.

В основе всех разрабатываемых модемов лежит два типа модуляции: широкополосная модуляция с прямым расширением спектра (*Direct Sequence Spread Spectrum* – DSSS) [19] для надежной передачи коротких сообщений и модуляция со множеством несущих (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* – OFDM) [20] для высокоскоростной передачи информационных пакетов большой емкости.

Параметры некоторых устройств, производимых СПбГМТУ, представлены в таблице 10. Внешний вид устройств приведен на рис. 10.

Таблица 10

ГА устройства СПбГМТУ

Параметр	OFDM модем «Вихрь-2»	ГСПС* с УКБ**	ГСПС двухчастотная
D , м	1000	1500	4000 и более
B , кГц	15-45	21-29	21-29 или 10-20
r , кбит/с	2-12	0.1-2.5	0.1-2
P_{tx} , Вт	2	2	10
P_{rx} , Вт	10	10	70
s , см	1600	3100	8000

* – гидроакустическая система позиционирования и связи;

** – ультракороткая база.



«Вихрь-2»

ГСПС с УКБ

ГСПС двухчастотная

Рис. 10 Внешний вид устройств СПбГМТУ

Из таблицы 10 видно, что СПБГМТУ может производить специфические варианты ГА устройств, комбинирующих различные программные, конструктивные и схемотехнические решения таким образом, чтобы добиться поставленных целей. Так, OFDM модем «Вихрь-2» выполняет задачу высокоскоростной передачи данных; ГСПС с УКБ позволяет как производить обмен данными, так и определять координаты других устройств; а двухчастотная ГСПС позволяет добиться большого радиуса действия и переключаться между двумя полосами частот для выбора наиболее оптимального варианта.

3. Гидроакустический модем СПБГМТУ

Рассмотрим подробнее алгоритмы приема и передачи данных, реализованные на физическом уровне представленных выше (таблица 10) устройств. Данные алгоритмы производят модуляцию и демодуляцию полезных данных, то есть выполняют роль модема. Поскольку в устройствах реализовано два вида модуляции, то условно разделим функции передачи и приема данных на два модема: OFDM модем и DSSS модем.

3.1. OFDM модем

OFDM модем включает в себя следующие пункты: вначале поток данных проходит через квадратурный амплитудный модулятор, далее преобразуется из последовательного в N параллельных, где N – число OFDM поднесущих. Квадратурные информационные символы распределяются по поднесущим и дополняются известными пилотными символами, по которым корректируется АЧХ в приемнике. Следующий этап – применение обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) [21] для формирования OFDM кадров. Обратное преобразование Фурье в блоке ОБПФ производит перенос символов из частотной во временную область, после чего в начало каждого символа OFDM записывается его конец для создания циклического префикса (ЦП). Полученные временные отсчеты в комплексном виде на нулевой частоте преобразуются в вещественные отсчеты на заданной несущей частоте с помощью интерполятора и квадратурного гетеродина. Сформированные данные передаются на последовательно включенные ЦАП, усилитель мощности и ГА антенну.

На приемной стороне из полученного кадра удаляется ЦП и выполняется перенос из временной области в частотную с помощью прямого быстрого преобразования Фурье (БПФ). Далее идет преобразование из N параллельных потоков данных в один последовательный. И, наконец, демодуляция

QAM с применением алгоритма с мягкими решениями.

В модеме предусмотрены 3 режима (B, C, D) для использования в различных помеховых ситуациях. Режим B предназначен для каналов передачи, имеющих частотную и временную селективность с задержками распространения; режим C – аналогично режиму B, но с повышенным эффектом Доплера; режим D – аналогично режиму B, но с существенными задержками распространения и значительным эффектом Доплера. Расчетная скорость передачи модема для различных режимов и видов модуляции варьируется в пределах от 1.7 кбит/с до 20 кбит/с. Стоит помнить, что расчетная скорость приводится для идеальных условий передачи с ОСШ много больше 1. В реальных условиях такие скорости часто недостижимы.

3.2. DSSS модем

DSSS модуляция основывается на замене каждого двух бит из потока данных на соответствующую псевдослучайную последовательность (одну из четырех). На стороне приемного устройства производится корреляционный прием, который включает в себя свертку полученного сигнала с каждой из четырех ПСП последовательностей и принятие решения в пользу одного из четырех наборов из двух бит, составляющих кодовые символы.

В модеме предусмотрен один режим со скоростью 100-200 бит/с.

4. Сравнительный анализ

Для проведения сравнительного анализа представленных в работе модемов условно разделим их на три группы: модемы ближнего радиуса действия (до 1000 м), модемы среднего радиуса действия (1000-3000 м) и модемы дальнего радиуса действия (от 3000 м). Также для каждого устройства приведем указанную производителем дальность работы, максимально возможную скорость передачи данных (реальную или рассчитанную), значение мощности, потребляемой в режиме излучения и массу устройства. По перечисленным параметрам будет производиться сравнение устройств. В таблице 11 представлены все рассмотренные выше модемы, распределенные по группам, соответствующим заявленному радиусу действия. На рис. 3-5 представлен графический вид сравнения характеристик рассматриваемых модемов.

Таблица 11

Сравнение модемов

Модем (производитель/модель)	D , м	r , кбит/с	$P_{\text{вх}}$, Вт	m , г
<i>Ближний радиус действия (до 1000 м)</i>				
EvoLogics R 48/78	1000	31.2	60	2250
LinkQuest UWM 1000	350	19.2	2	4200
СПБГМТУ «Вихрь-2»	1000	12.0	10	1600
Sonardyne Modem 6 Sub-Mini	1000	9.0	-	3200
UC&NL uWave	1000	0.078	6	-
Water Linked M64	200	0.064	-	130
Water Linked M16	500	0.016	2	40

Средний радиус действия (1000-3500 м)				
LinkQuest UWM 2000	1500	19.2	8	4800
Teledyne Benthos ATM-900 Series	2000	15.36	60	5400/4100/7300
EvoLogics R 18/34	3500	13.9	65	2245
Sonardyne Modem 6 Mini	3000	9.0	-	5100
LinkQuest UWM 3000	3000	5.0	12	4100
СПБГМТУ ГСПС с УКБ	1500	2.5	10	3100
AQUATELE.COM ATM-120EM	3500	4.0	35	-
AQUATELE.COM ATM-28	3500	4.0	35	-
Дальний радиус действия (от 3500 м)				
LinkQuest UWM 4000	4000	9.6	7	7600
EvoLogics R 12/24	6000	9.2	57	2990
Sonardyne Modem 6 Standard	5000	9.0	-	23800
EvoLogics R 7/17	8000	6.9	45	4700
LinkQuest UWM 10000	10000	5.0	40	21000
Teledyne Benthos ATM-900 Series	4000	2.4	60	5400/4100/7300
СПБГМТУ ГСПС двухчастотная	4000	2.0	70	8000
AQUATELE.COM ATM-280EM	15000	1.7	60	-
L3HARRIS GPM 300	18000	1.0	300	12000-18000
DSPComm Aquacommm Gen2	8000	1.0	60	-
DSPComm Aquacommm	5000	0.48	24	-
Teledyne Benthos ATM-900 Series	6000	0.08	60	5400/4100/7300
UC&NL RedLine	8000	0.08	10	-

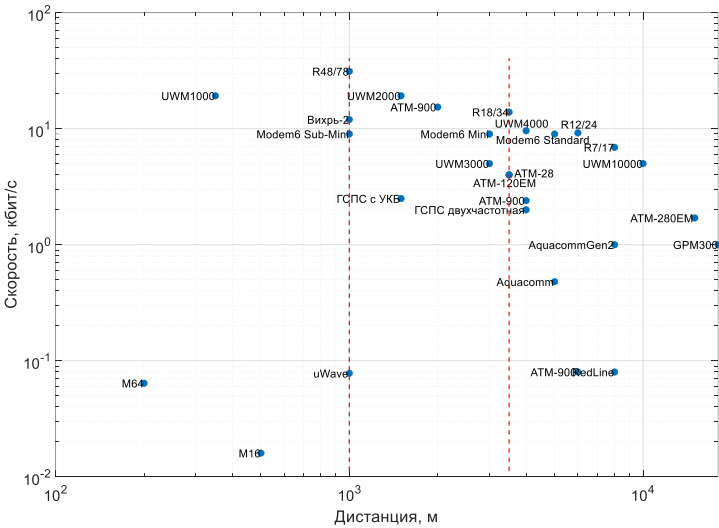


Рис. 11 График отношения скорости передачи данных от дистанции

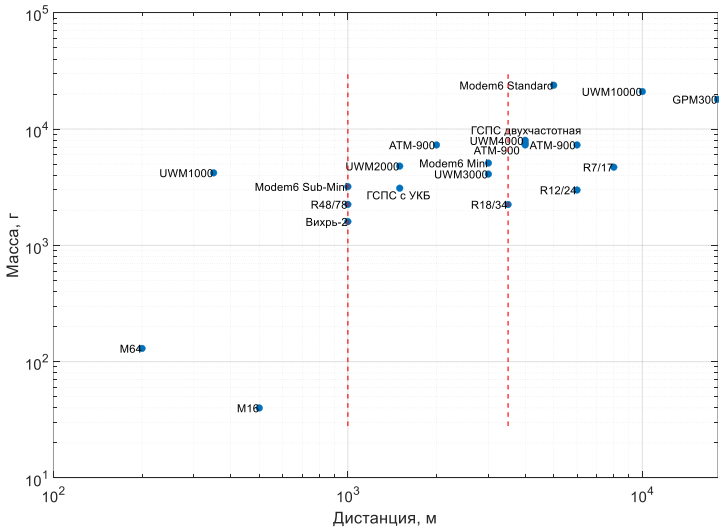


Рис. 12 График отношения массы устройства от дистанции

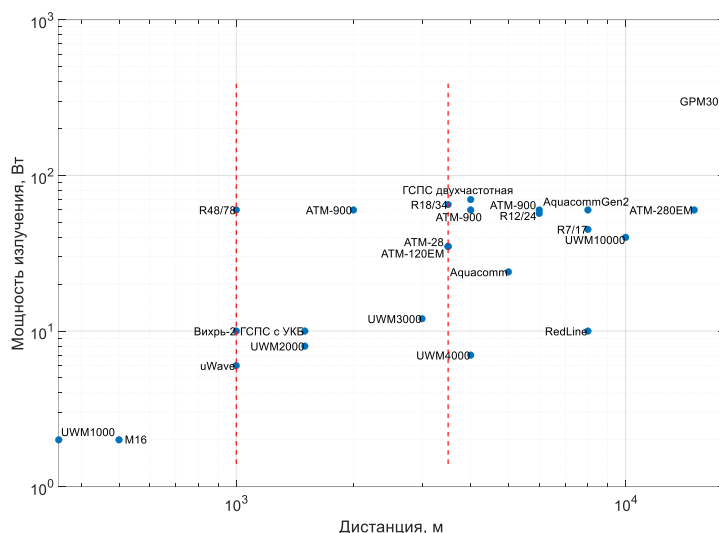


Рис. 13 График отношения потребляемой при излучении мощности от дистанции

Исходя из таблицы 13 и рис. 3-5, можно сделать следующий, общий для большинства рассмотренных устройств, вывод: с увеличением рабочей дистанции скорость передачи данных снижается, при этом масса устройства и потребляемая им мощность в режиме излучения растут. Так, в ближнем и среднем радиусе действия при рассмотрении всех устройств, кроме устройств СПбГМТУ, среднее значение скорости передачи данных составляет около 10 кбит/с, а в дальнем – 3 кбит/с. Среднее значение массы – 2, 5 и 11 кг для ближнего, среднего и дальнего радиуса действия соответственно. И среднее значение потребляемой мощности в режиме излучения – 17, 35 и 65 Вт для ближнего, среднего и дальнего радиуса действия соответственно.

Теперь проанализируем устройства СПбГМТУ в сравнении с полученными средними значениями характеристик:

- Скорость передачи данных модема «Вихрь-2» сопоставима со средним показателем, при этом по массе устройство одно из самых легких в группе ближнего действия (если не рассматривать мини-модемы), а по потребляемой мощности модем показывает результаты ниже среднего значения.
- ГСПС с УКБ имеет скорость передачи данных меньшую, чем у большинства в группе среднего радиуса действия, но при этом имеет одни из самых малых показатели по потребляемой мощности и массе, а также имеет функцию позиционирования.
- Двухчастотная ГСПС сопоставима по скорости передачи с другими устройствами группы дальней

зоны действия, масса и потребляемая мощность также находятся около среднего значения.

В итоге можно сделать вывод, что ГА устройства, которые разрабатывает СПбГМТУ, сопоставимы с другими модемами различных производителей, при этом представленные устройства охватывают большой диапазон рабочих дальностей, могут быть использованы как для высокоскоростной передачи данных, так и для высоконадежной, а также позволяют выполнять дополнительные функции, например, позиционирование.

Заключение

В статье были представлены основные разработчики ГА модемов как на зарубежном рынке, так и на российском. Также была приведена основная информация об устройствах, разрабатываемых в СПбГМТУ, и представлено итоговое сравнение всех рассмотренных в статье устройств.

Был сделан вывод о том, что ГА модемы, которые производит СПбГМТУ, сопоставимы по характеристикам с другими популярными моделями различных производителей. Соответственно, с представленным в работе набором характеристик и возможным дальнейшим улучшением своих устройств СПбГМТУ выходят на небольшой российский рынок ГА модемов с высоким стартовым потенциалом и возможностью конкурировать с уже устоявшимися производителями.

Литература

1. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко [и др.]. – Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2018. – 367 с.
2. Автономные подводные роботы: системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко [и др.]; под общ. ред. акад. М.Д. Агеева. – Москва: Наука, 2005. – 398 с.
3. Annalakshmi G., Sakthivel Murugan M. Underwater Acoustic Modem - Challenges, Technology and Applications - A Review Survey // Oceanography & Fisheries Open Access Journal. – 2017. – № 2. – P. 60–69.
4. Шарафутдинова Т.К. Сравнительный анализ промышленных гидроакустических модемов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2021. – № 6. – С. 832-841.
5. Domingo M.C. An overview of the internet of underwater things // Journal of Network and Computer Applications. – 2012. – Т. 35. – № 6. – P. 1879–1890.

6. Acoustic ducting, reflection, refraction, and dispersion by curved nonlinear internal waves in shallow water / J. F. Lynch, Y. -T. Lin, T. F. Duda and A. E. Newhall // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2010. – V. 32. – № 1. – P. 12-27.
7. Stojanovic M., Freitag L., Johnson M. Channel-Estimation-Based Adaptive Equalization of Underwater Acoustic Signals // Oceans '99. MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century. Conference and Exhibition. Conference Proceedings. – Seattle, WA, USA, 1999. – V. 2. – P. 590-595.
8. Mani S., Duman T.M., Hurski P. Adaptive Coding/Modulation for Schallow-Water // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2008. – V. 123. – P. 3749.
9. Кебкал К.Г., Машошин А.И., Мороз Н.В. Пути решения проблем создания сетевой подводной связи и позиционирования // Гирокоспия и навигация. – 2019. – Т. 27. – №2. – С. 106-135.
10. EvoLogics GmbH: Underwater Acoustic Modems. – URL: <https://evologics.de/acoustic-modems> (дата обращения 01.12.2023). – Текст: электронный.
11. Underwater Wireless Modem & Communication Devices: Aquacommm Gen2: next generation underwater wireless modem. – URL: <https://www.dspcommgen2.com/aquacommm-gen2-next-generation-acoustic-modem/> (дата обращения 01.12.2023). – Текст: электронный.
12. Teledyne Marine Technologies Incorporated: Acoustic Modems. – URL: https://www.teledynemarine.com/en-us/products/Pages/Acoustic_Modems.aspx (дата обращения 01.12.2023). – Текст: электронный.
13. Water Linked: Underwater Acoustic Modem. URL: <https://waterlinked.com/modem> (дата обращения 01.12.2023). – Текст: электронный.
14. Sonardyne: Modem 6 (subsea) – Underwater acoustic modem. – URL: <https://www.sonardyne.com/products/underwater-acoustic-modems/> (дата обращения 01.12.2023). – Текст: электронный.
15. L3Harris Technologies, Inc: Acoustic general purpose modem. – URL: <https://www.l3harris.com/all-capabilities/acoustic-general-purpose-modem> (дата обращения 01.12.2023). – Текст: электронный.
16. LinkQuest, Inc. 1999: Underwater Acoustic Modem Models. – URL: <https://www.link-quest.com/html/models1.htm> (дата обращения 01.12.2023). – Текст: электронный.
17. AQUATELE.COM: продукция. – URL: <https://aquatele.com/products.html> (дата обращения 01.12.2023)
18. UC&NL. Underwater communication & navigation laboratory: продукция. – URL: <https://www.unavlab.com/produksiya/> (дата обращения 01.12.2023). – Текст: электронный.
19. Когновицкий О.С. Широкополосные сигналы данных с расширением спектра прямой последовательностью и их характеристика // Труды учебных заведений связи. – 2016. – Т. 1. – № 2. – С. 82-89.
20. Шагарова А.А. Принципы формирования OFDM-символов согласно стандартам 802. 11, 802. 16 // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2010. – Т. 50. – №2. – С. 62-63.
21. Нуссбаумер Генри Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток / Г. Нуссбаумер; пер. с англ. Ю.Ф. Касимова, И.П. Пчелинцева; под ред. В.М. Амербаева, Т.Э. Кренкеля. – Москва: Радио и связь, 1985. – 248 с.

References

1. *Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sistemy, tekhnologii, primenenie [Underwater robotics: systems, technologies, application]*, A.V. Inzartsev, L.V. Kiselev, V.V. Kostenko [i dr.]. Vladivostok: IPMT DVO RAN, 2018, 367 s.
2. *Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tekhnologii [Autonomous underwater robots: systems and technologies]*, M.D. Ageev, L.V. Kiselev, Yu.V. Matvienko [i dr.]; pod obshch. red. akad. M.D. Ageeva, Moskva: Nauka, 2005, 398 s.
3. Annalakshmi G., Sakthivel Murugan M. *Underwater Acoustic Modem - Challenges, Technology and Applications - A Review Survey*, Oceanography & Fisheries Open Access Journal, 2017, № 2, P. 60–69.
4. Sharafutdinova T.K. *Sravnitel'nyy analiz promyshlennykh gidroakusticheskikh modemov [Comparative analysis of industrial hydroacoustic modems]*, Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova, 2021, № 6, C. 832-841.
5. Domingo M.C. *An overview of the internet of underwater things*, Journal of Network and Computer Applications, 2012, T. 35, № 6, P. 1879–1890.
6. J. F. Lynch, Y. -T. Lin, T. F. Duda and A. E. Newhall *Acoustic ducting, reflection, refraction, and dispersion by curved nonlinear internal waves in shallow water*, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2010, V. 32, № 1, P. 12-27.
7. Stojanovic M., Freitag L., Johnson M. *Channel-Estimation-Based Adaptive Equalization of Underwater Acoustic Signals*, Oceans '99. MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century. Conference and Exhibition. Conference Proceedings, Seattle, WA, USA, 1999, V. 2, P. 590-595.
8. Mani S., Duman T.M., Hurski P. *Adaptive Coding/Modulation for Schallow-Water*, The Journal of the Acoustical Society of America, 2008, V. 123, P. 3749.
9. Кебкал К.Г., Машошин А.И., Мороз Н.В. *Puti resheniya problem sozdaniya setevoy podvodnoy svyazi i pozitsionirovaniya [Ways to solve the problems of creating a network of underwater communications and positioning]*, Girkoskopiya i navigatsiya, 2019, T. 27, №2, S. 106-135.
10. EvoLogics GmbH: Underwater Acoustic Modems. – URL: <https://evologics.de/acoustic-modems> (data obrashcheniya 01.12.2023). – Tekst: elektronnyy.
11. Underwater Wireless Modem & Communication Devices: Aquacommm Gen2: next generation underwater wireless modem. – URL: <https://www.dspcommgen2.com/aquacommm-gen2-next-generation-acoustic-modem/> (data obrashcheniya 01.12.2023). – Tekst: elektronnyy.

12. Teledyne Marine Technologies Incorporated: Acoustic Modems. – URL: https://www.teledynemarine.com/en-us/products/Pages/Acoustic_Modems.aspx (data obrashcheniya 01.12.2023). – Tekst: elektronnyy.
13. Water Linked: Underwater Acoustic Modem. URL: <https://waterlinked.com/modem> (data obrashcheniya 01.12.2023). – Tekst: elektronnyy.
14. Sonardyne: Modem 6 (subsea) – Underwater acoustic modem. – URL: <https://www.sonardyne.com/products/underwater-acoustic-modems/> (data obrashcheniya 01.12.2023). – Tekst: elektronnyy.
15. L3Harris Technologies, Inc: Acoustic general purpose modem. – URL: <https://www.l3harris.com/all-capabilities/acoustic-general-purpose-modem> (data obrashcheniya 01.12.2023). – Tekst: elektronnyy.
16. LinkQuest, Inc. 1999: Underwater Acoustic Modem Models. – URL: <https://www.link-quest.com/html/models1.htm> (data obrashcheniya 01.12.2023). – Tekst: elektronnyy.
17. AQUATELE.COM: produktsiya. – URL: <https://aquatele.com/products.html> (дата обращения 01.12.2023)
18. UC&NL. Underwater communication & navigation laboratory: produktsiya. – URL: <https://www.unavlab.com/produktsiya/> (data obrashcheniya 01.12.2023). – Tekst: elektronnyy.
19. Kognovitskiy O.S. *Shirokopolosnye signaly dannykh s rasshireniem spektra pryamoy posledovatel'nost'yu i ikh kharakteristika [Wideband Direct Sequence Spread Spectrum Data Signals and Their Characteristics]*, Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi, 2016, T. 1, № 2, S. 82-89.
20. Shagarova A.A. *Printsipy formirovaniya OFDM-simvolov soglasno standartam 802. 11, 802. 16 [Principles of formation of OFDM symbols according to standards 802.11, 802.16]*, Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2010, T. 50, №2, S. 62-63.
21. Nussbaumer Genri *Bystroe preobrazovanie Fur'e i algoritmy vychisleniya svertok [Fast Fourier transform and convolution algorithms]*, G. Nussbaumer; per. s angl. Yu.F. Kasimova, I.P. Pchelintseva; pod red. V.M. Amerbaeva, T.E. Krenkelya, Moskva: Radio i svyaz', 1985, 248 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

Тузова Анна Андреевна, инженер 2 категории, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: tuzova.smtu@yandex.ru

Anna A. Tuzova, engineer of the 2nd category, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: tuzova.smtu@yandex.ru

Кузнецов Андрей Геннадьевич, ведущий инженер, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: andky@inbox.ru

Andrei G. Kuznetsov, lead engineer, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: andky@inbox.ru

Назаров Андрей Михайлович, начальник (Научно-исследовательский сектор морских электронных систем), Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: nazarovmail@yandex.ru

Andrei M. Nazarov, Head (Scientific Research Sector of Marine Electronic Systems), St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: nazarovmail@yandex.ru

Захарьева Ольга Владимировна, начальник отдела лицензирования и сертификации видов деятельности СПбГМТУ по оборонной тематике, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: science@SMTU.RU

Ol'ga V. Zahar'eva, Head of the Department of Licensing and Certification of types of activities of St. Petersburg state marine technical University on Defense topics, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: science@SMTU.RU

Блинков Алексей Павлович, заместитель начальника Управления оборонных исследований и разработок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: Blinkov@SMTU.RU

Aleksey P. Blinkov, Deputy Head of the Department of Defense Research and Development, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: Blinkov@SMTU.RU

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 26.12.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.02.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 15.02.2024.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Научная статья

УДК 656.61.052 (075)

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.025>

Оптимизация скорости и курса судна в штормовых условиях

Каминский В.Ю.¹ Kaminskyvy@yandex.ru, Скороходов Д.А.¹ skorohodda@mail.ru,
Никитин Н.В.² morintex_spb@mail.ru

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук,

²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Проблема обеспечения безопасного плавания судна в штормовых условиях остается нерешенной до настоящего времени. Современные суда оснащены системой мониторинга параметров волнения моря, фиксирующей актуальные и предшествующие значения определяющих параметров. Получение в онлайн режиме объективных данных о параметрах штормового волнения и использование их в сочетании с исходными данными о параметрах судна, введенными в порт перед выходом в море в бортовое вычислительное устройство, позволяют алгоритмизировать выбор безопасного курса и скорости в условиях шторма. При этом участие штурмана ограничивается только выполнением рекомендаций, выработанных вычислительным устройством, обеспечивающим информационную поддержку судоводителю по недопущению критических значений скорости судна, его курсового угла на волне, углов по крену и дифференту для сохранности груза и комфортных условий обитания экипажа (уменьшение вероятности морской болезни). Технический уровень современных процессорных систем управления скоростью и курсом судов позволяет обеспечить реализацию предлагаемого алгоритма автоматического определения оптимальных курса и скорости судна в штормовых условиях, для исключения попадания его в резонанс с волнением моря, как при бортовой, так и при килевой качке.

Ключевые слова: информационная поддержка, штормовые условия, скорость, амплитуда, безопасность, бортовая качка, курсовой угол, резонансная зона, оптимизация.

Финансирование: работа выполнена в рамках исполнения государственного задания ИПТ РАН №075-01352-23-0 на 2023 год и на плановый период 2024 и 2025 годов за счет средств предоставленной Минобрнауки России субсидии (Соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 13.01.2023 №075-03-2023-431).

Для цитирования: Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Никитин Н.В. Оптимизация скорости и курса судна в штормовых условиях, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 209—215. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.025

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.025>

Optimization of the ship's speed and course in stormy conditions

Valery Yu. Kaminsky¹ Kaminskyvy@yandex.ru, Dmitry A. Skorokhodov¹ skorohodda@mail.ru,
Nikolai V. Nikitin² morintex_spb@mail.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science,

²St. Petersburg state marine technical University

Abstract. The problem of ensuring the safe navigation of the vessel in stormy conditions remains unresolved to date. Modern vessels are equipped with a system for monitoring the parameters of sea waves, which records the current and previous values of the defining parameters of the wave. Obtaining objective data on storm surge parameters online and using them in combination with the initial data on the ship's parameters entered into the on-board computing device in the port before going to sea allows you to algorithmize the choice of a safe course and speed in stormy conditions. At the same time, the navigator's participation is limited only to the implementation of recommendations developed by a computing device that provides information support to the skipper to prevent critical values of the vessel's speed, its heading angle on the wave, roll and trim angles for the safety of cargo and comfortable living conditions of the crew (reducing the likelihood of seasickness). The technical level of modern processor systems for controlling the speed and course of ships allows for the implementation of the proposed algorithm for automatically determining the optimal course and speed of a vessel in stormy conditions, in order to exclude its resonance with the waves of the sea, both during on-board and keeling.

Keywords: information support, storm conditions, speed, amplitude, safety, side pitching, heading angle, resonance zone, optimization.

Financial Support: the work was carried out as part of the execution of the state task of the IPT RAS № 075-01352-23-0 for 2023 and for the planned period of 2024 and 2025 at the expense of the 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 13 January 2023 № 075-03-2023-431).

For citation: Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorohodov, Nikolai V. Nikitin Optimization of the ship's speed and course in stormy conditions, Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 209—215. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.025

Введение

Проблема обеспечения безопасного плавания судна в штормовых условиях остается нерешенной до настоящего времени. Впервые этому вопросу было уделено внимание в работах [1,2]. В работе [3] были представлены результаты натурных испытаний и приведены номограммы по выбору курса и скорости судна в штормовых условиях. Однако, как показал опыт, практическое применение номограмм не было удобным и они не нашли широкого применения. В работах [4-6,9] были предприняты попытки реализации информационной поддержки, позволяющей упростить процесс выбора штурманом оптимальных курсов и скоростей в штормовых условиях.

Получение в онлайн режиме объективных данных о параметрах штормового волнения моря и использование их в сочетании с исходными данными о параметрах судна, введенными в порт перед выходом в море в бортовое вычислительное устройство, позволяют алгоритмизировать выбор безопасных курсов и скоростей в штормовых условиях. При этом участие штурмана ограничивается только выполнением рекомендаций, выработанных вычислительным устройством.

Определение периода собственных поперечных колебаний судна

Период собственных поперечных колебаний судна, $T_{C\theta}$, определяется по формуле (1) [1]:

$$T_{C\theta} = 2\pi \sqrt{\frac{J_x + \Delta J_x}{Dh}}, \quad (1)$$

где: J_x – поперечный момент инерции масс судна, т/м²; ΔJ_x – поперечный момент инерции присоединенных масс воды, т/м²; D – весовое водоизмещение судна, т; h – начальная поперечная метацентрическая высота, м.

Для получения общего момента инерции, $J_x + \Delta J_x$, можно воспользоваться выражением (2) [1]:

$$J_x + \Delta J_x = D \cdot \left(\frac{B^2 \cdot \alpha^2}{11,4 \cdot C_B} + \frac{H^2}{12} \right), \quad (2)$$

где: B – ширина судна, м; α – коэффициент полноты ватерлинии; C_B – коэффициент общей полноты; H – высота борта, м.

На основании формулы (2) для ряда транспортных судов построен график бортовой качки, входящий в диаграмму контроля и регулирования нагрузки судов, предложенную Г.Е.Павленко [1,2]. Этот график показывает значения

периода $T_{C\theta}$, для любого варианта загрузки судна.

При отсутствии такого графика величина $T_{C\theta}(c)$ может быть приближенно вычислена по формуле:

$$T_{C\theta} = \frac{f \cdot B}{\sqrt{h}}, \quad (3)$$

где: f – коэффициент, приближенно равный 0,8; B – ширина судна, м; h – начальная поперечная метацентрическая высота, м.

Вычислить метацентрическую высоту судна, h , после погрузки перед выходом судна в море можно по формуле

$$h = h_0 + \Delta h, \quad (4)$$

где: h_0 – метацентрическая высота порожнего судна, известная из документации, м; Δh – изменение метацентрической высоты судна после выполнения операции погрузки, м; определяемое по формуле:

$$\Delta h = \frac{m}{D+m} \cdot \left(d + \frac{m}{200 \cdot q} - Z_p - h_0 \right), \quad (5)$$

где: m – масса принятого груза, т; d – осадка судна до начала грузовых операций, м; q – число тонн на сантиметр осадки; Z_p – расстояние между центром тяжести и килем порожнего судна, м;

Вычисление границ периода поперечных колебаний судна

Известно, при движении судна в условиях волнения, кажущаяся частота встречи судна с волной, ω_K , определяется формулой (6):

$$\omega_K = \omega_B + \frac{\omega_B^2}{g} \cdot V_C \cdot \cos \varphi_C, \quad (6)$$

где: ω_B – частота волнения моря, 1/с; g – ускорение силы тяжести, м/с²; V_C – скорость судна при движении заданным курсом, м/с; φ_C – курсовой угол встречи судна с генеральным направлением бега волн, град.

Анализ соотношения (6) показывает, что при движении судна лагом к волне $|\varphi_C| = 90^\circ$, истинная – ω_B и кажущаяся – ω_K частоты совпадают. Если судно движется навстречу волне, $0 \leq |\varphi_C| < 90^\circ$, то кажущаяся частота волнения оказывается больше истинной. Более сложная зависимость реализуется при движении судна по волне. В этом случае возможны такие условия движения, при которых

попутное волнение имеет нулевую кажущуюся частоту $\omega_K = 0$. Это происходит при совпадении скорости волны, V_B , и скорости судна, V_C : $V|\cos \varphi_C| = V_B$, когда их взаиморасположение сохраняется без изменения. При других скоростях судно может отставать от волны: $V|\cos \varphi_C| < V_B$ или обгонять ее: $V|\cos \varphi_C| > V_B$.

В первом случае частота волнения лежит в диапазоне $0 < \omega_K < \frac{1}{a}$ и кажущаяся частота оказывается меньше истинной. Во втором случае частота волнения $\omega_K > \frac{1}{a}$ и кажущаяся частота превосходит частоту истинную.

Преобразуем выражение (6), выразив частоту через период колебаний $\omega = \frac{2\pi}{T}$ и запишем его относительно кажущегося периода встречи судна с волной, T_K , с:

$$T_K = \frac{T_B^2 \cdot g}{gT_B + 2\pi \cdot V_C \cdot \cos \varphi_C}, \quad (7)$$

где: T_B – период штормового волнения моря, с.

При движении судна заданным курсом в штормовых условиях со скоростью V_C кажущийся период встречи судна с волной T_K можно вычислить по данным навигационной станции о периоде штормового волнения моря T_B и генеральном направлении бега волн, определив курсовой угол встречи судна с волной – φ_C .

При полученном курсовом угле встречи судна с генеральным направлением бега волн φ_C можно определить границы скорости судна до $V_{C(0,7)}$ и после $V_{C(1,3)}$ резонансной зоны колебаний судна на волне.

Вычислим границу скорости до резонансной зоны $V_{C(0,7)}$.

$$\text{При } V_{C(0,7)} \text{ отношение } \frac{T_{C\theta}}{T_K} = 0,7.$$

Тогда из выражения (7) следует:

$$T_{C\theta} = 0,7 \cdot \frac{T_B^2 \cdot g}{g \cdot T_B + 2\pi \cdot V_{C(0,7)} \cdot \cos \varphi_C},$$

или:

$$\begin{aligned} V_{C(0,7)} &= \frac{0,7 \cdot g \cdot (T_B^2 - T_{C\theta} \cdot T_B)}{2\pi \cdot T_{C\theta} \cdot \cos \varphi_C} = \\ &= \frac{1,095 \cdot (T_B^2 - T_{C\theta} \cdot T_B)}{T_{C\theta} \cdot \cos \varphi_C}. \end{aligned} \quad (8)$$

Аналогично вычисляем границу скорости после резонансной зоны $V_{C(1,3)}$:

$$\text{При } V_{C(1,3)} \text{ отношение } \frac{T_{C\theta}}{T_K} = 1,3, \text{ тогда}$$

$$\begin{aligned} V_{C(1,3)} &= \frac{1,3 \cdot g \cdot (T_B^2 - T_{C\theta} \cdot T_B)}{2\pi \cdot T_{C\theta} \cdot \cos \varphi_C} = \\ &= \frac{2,033 \cdot (T_B^2 - T_{C\theta} \cdot T_B)}{T_{C\theta} \cdot \cos \varphi_C}. \end{aligned} \quad (9)$$

По полученным данным о периоде штормового волнения моря T_B (длине волны λ_B) и направлению распространения волнения моря (курсовом угле судна по отношению к полученному направлению волн φ_C), отношение периода собственных колебаний судна к кажущемуся периоду встречи судна с волной $T_{C\theta} / T_K$ при известной скорости судна V_C определяется выражением (10) [2, 3]:

$$\frac{T_{C\theta}}{T_K} = \frac{T_{C\theta} \cdot (1,25 \cdot \sqrt{\lambda_B} + 0,514 \cdot V_C \cdot \cos \varphi_C)}{\lambda_B}, \quad (10)$$

где: V_C – скорость судна в узлах, λ_B – длина волны в метрах.

Если отношение $T_{C\theta} / T_K$ находится в пределах 0,7 – 1,3, то качка будет происходить в условиях резонанса с амплитудой θ , вычисляемой по формуле (11):

$$\theta = 1,1 \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{mq} \cdot J_X}{0,0015 \cdot L \cdot B^4 + 0,4 \cdot S \cdot b^3}}, \quad (11)$$

где: S – суммарная площадь обоих скуловых килей, m^2 ; b – расстояние от скулового килля до центра тяжести судна, м (если судно не оборудовано скуловыми киллями – $b = 0$);

α_{mq} – приведённый угол волнового склона,

$$\alpha_{mq} = \alpha_0 \cdot k_{m\theta} \cdot \sin \varphi_C, \quad \alpha_0 = 3,14 \cdot \frac{h_B}{\lambda_B} \quad - \text{ угол}$$

волнового склона, радианы; h_B – высота волны, м;

$k_{m\theta}$ – коэффициент, учитывающий влияние осадки судна на амплитуду возмущающей силы (выбирается по коэффициенту вертикальной полноты и отношению осадки судна к длине волны).

Оптимизация параметров бортовой качки судна

От расположения грузов на судне зависят и период, и амплитуда бортовой качки. При составлении грузового плана стремятся придать судну такую остойчивость, при которой качка была бы наиболее приемлемой.

Считается, что качка может быть плавной, если h/B не превышает 0,05.

С учётом реальных условий эта величина может значительно колебаться в зависимости от типа судна [7]. При увеличении метацентрической высоты - h уменьшается период собственных колебаний судна - T и сочетается с амплитудой качки θ по закону:

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} \approx \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2. \quad (12)$$

На экипаж существенное влияние оказывают вертикальные линейные ускорения. При бортовой качке они складываются как из ускорений от непосредственно бортовой качки, так и от вертикальной качки. Основной причиной укачивания является физиологическое влияние возникающих угловых и линейных ускорений. Порог чувствительности к угловым ускорениям лежит в пределах 2-3 °/с², а к вертикальным 0,4-0,12 м/с² [8]. Особенно интенсивно «морская болезнь» развивается, когда вертикальные ускорения достигают примерно 0,1 g $\approx$ 1 м/с².

Вертикальные ускорения в данной точке судна являются следствием не только линейных, но и угловых колебаний. Наибольшие вертикальные ускорения возникают в оконечностях судна.

Допустимые амплитуды бортовой качки θ_{max} , при которых вертикальные ускорения не превышают 0,1 g, соответствуют условиям (13) [8]:

$$\theta_{max} \leq \theta = 0,1 g \cdot \left(\frac{T_\theta}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{2}{B} \cdot 57,3^\circ, \quad (13)$$

где: T_θ – период бортовой качки, B – наибольшая ширина судна.

Кроме «морской болезни» качка судна также влияет на снижение возможностей экипажа выполнять различные задачи вследствие потери равновесия.

Исследования потерь времени, вызванных потерей равновесия членами команды из-за качки, проведенные в центре им. Д.Тейлора [8], позволили получить универсальный показатель, обозначенный как *MII* (*Motion Induced Interruptions*).

Фактически *MII* представляет собой функцию, отражающую состояние равновесия членов команды. *MII* характеризует возникновение условий, когда человек должен неизбежно либо ухватиться за что-нибудь, либо изменить позу для удержания равновесия.

В качестве приближенного показателя *MII* используют «оценочный показатель» поперечной силы *LFE* (*Lateral Force Estimator*) или боковые перегрузки. Боковые перегрузки делят по степеням риска.

Первый уровень риска - $LFE = 0,08 \cdot g$. При такой качке однократная потеря равновесия приходится на 18 операций, осуществленных членом экипажа на верхней палубе судна.

Второй уровень риска соответствует $LFE = 0,1 \cdot g$.

Утрата равновесия при этом приходится на каждые две выполняемые операции.

Серьезный уровень риска – потеря равновесия 1,44 раза на одну операцию - $LFE = 0,12 \cdot g$.

Высокий уровень риска – 2,61 раза потери равновесия на одну операцию $LFE = 0,14 \cdot g$.

Чрезвычайно опасные условия – 4 раза утраты равновесия на одну операцию, $LFE \geq 0,16 \cdot g$.

Для пассажирских судов желательно, чтобы качка не вызвала слишком сильных симптомов «морской болезни» у пассажиров.

Это условие будет соблюдаться, если

$$\theta^\circ \leq 2,85 \cdot \frac{B \cdot c^2}{h}, \quad (14)$$

где: θ° – амплитуда бортовой качки, град.;

C – коэффициент, зависящий от типа судна и его загрузки (от 0,76 до 0,81); B – ширина судна, м; h – метацентрическая высота, м.

Продольная качка судна

Период собственных продольных колебаний судна $T_{C\psi}$ определяется формулой (15) [3, 4]

$$T_{C\psi} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J_y + \Delta J_y}{D \cdot H}}, \quad (15)$$

где: J_y – продольный момент инерции масс

судна, т/м²; ΔJ_y – продольный момент инерции присоединённых масс воды, т/м²; D – весовое водоизмещение, т; H – продольная метацентрическая высота, м.

Формула (15) является точной для судна, симметричного относительно миделя и сидящего на ровном киле. Также она даёт хорошие результаты и для судов, обладающих незначительной асимметричностью и имеющих небольшой дифферент.

Пренебрегая несущественной разницей между продольной метацентрической высотой H и продольным метацентрическим радиусом R , принимаем:

$$D \cdot H \approx D \cdot R = \rho \cdot g \cdot J_0, \quad (16)$$

где: ρ – массовая плотность воды; g =

9,81 м/с² – ускорение силы тяжести; J_0 – продольный момент инерции площади ватерлинии.

Тогда выражение (15) с учетом (16) принимает вид:

$$T_{C\psi} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J_y + \Delta J_y}{\rho \cdot g \cdot J_0}}. \quad (17)$$

Для точного вычисления моментов инерции, входящих в уравнение (17) необходимо иметь теоретический чертёж и масштаб Бонжана, а также знать характер распределения веса судна со всеми грузами по 20 теоретическим шпациям.

На практике, с достаточной точностью, можно сравнительно просто определить $T_{0\psi}$. Представим продольный момент инерции [1, 2] в виде:

$$J_y = 0,065 \cdot \rho \cdot \alpha \cdot \delta \cdot L^3 \cdot B \cdot T, \quad (18)$$

где: α – коэффициент полноты ватерлинии; δ – коэффициент полноты водоизмещения (коэффициент общей полноты); L – длина судна; T – средняя осадка.

Продольный момент инерции площади ватерлинии - J_0 и момент инерции присоединённых масс воды -- ΔJ_y могут быть определены по приближённым выражениями (19, 20), полученным заменой истинного обвода ватерлинии параболической кривой:

$$J_0 = \frac{L^3 \cdot B}{12} \cdot \frac{\alpha}{\delta - 2 \cdot \alpha}; \quad (19)$$

$$\Delta J_y = a_1 \cdot a_2 \cdot \frac{\pi}{48} \cdot \rho \cdot L^3 \cdot B \cdot \frac{\alpha^2}{(3 - \alpha) \cdot (3 - 2\alpha)} \quad (20)$$

где: a_1 и a_2 – коэффициенты, первый из которых зависит от отношения L/B , а второй - от коэффициента вертикальной полноты судна и, незначительно, от отношения B/T .

При фактических соотношениях размерений судна и коэффициентов его полноты, произведение $a_1 \cdot a_2$ для морских транспортных судов можно считать, равным единице.

На основании выражений (17–20), получим простую и удобную формулу для практического определения периода собственных продольных колебаний судна $T_{C\psi}$:

$$T_{C\psi} = 1,77 \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{3 - \alpha} \cdot B + T \cdot \delta (3 - 2\alpha)}. \quad (21)$$

Формулу можно свернуть:

$$T_{C\psi} = k \cdot \sqrt{T}, \quad (22)$$

$$\text{где } k = 1,77 \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{3 - \alpha} \cdot \frac{B}{T} + \delta (3 - 2\alpha)}.$$

Также как при определении границ скорости судна до и после резонансной зоны его колебаний на штормовой волне в случае бортовой качки, определим эти границы и для килевой качки.

Вычисляем границу скорости до резонансной зоны $V_{C(0,7)}$. Для $V_{C(0,7)}$ отношение $\frac{T_{C\psi}}{T_K} = 0,7$.

Тогда из выражения (7) следует:

$$T_{C\psi} = 0,7 \cdot \frac{T_B^2 \cdot g}{g \cdot T_B + 2\pi \cdot V_{C(0,7)} \cdot \cos \varphi_C},$$

или

$$V_{C(0,7)\psi} = \frac{0,7 \cdot g \cdot (T_B^2 - T_{C\psi} \cdot T_B)}{2\pi \cdot T_{C\psi} \cdot \cos \varphi_C} = \frac{1,095 \cdot (T_B^2 - T_{C\psi} \cdot T_B)}{T_{C\psi} \cdot \cos \varphi_C}. \quad (23)$$

Аналогично вычисляем границу скорости после резонансной зоны $V_{C(1,3)}$:

Для $V_{C(1,3)}$ отношение $\frac{T_{C\psi}}{T_K} = 1,3$, тогда

$$V_{C(1,3)} = \frac{1,3 \cdot g \cdot (T_B^2 - T_{C\psi} \cdot T_B)}{2\pi \cdot T_{C\psi} \cdot \cos \varphi_C} = \frac{2,033 \cdot (T_B^2 - T_{C\psi} \cdot T_B)}{T_{C\psi} \cdot \cos \varphi_C}. \quad (24)$$

Как отмечалось выше в случае бортовой качки, допустимые амплитуды килевой качки ψ_{max} , при которых вертикальные ускорения, вызывающие морскую болезнь, также не должны превышать $0,1 \cdot g$, соответствуют условиям (25):

$$\psi_{max} \leq \psi = 0,1 g \cdot \left(\frac{T_\psi}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{2}{L} \cdot 57,3^\circ, \quad (25)$$

где: T_ψ – период килевой качки, L – наибольшая длина судна.

Период килевой качки можно определить по следующей формуле [3]:

$$T_\psi \approx 2\pi \cdot \sqrt{\frac{2J_y}{D \cdot H_0}} \approx 2\pi \cdot \sqrt{\frac{1,96 \cdot C_B \cdot d}{g \cdot \alpha}}, \quad (26)$$

где: H_0 – продольная метацентрическая высота, м; J_y – момент инерции массы судна

относительно поперечной оси, т/м²; C_B – коэффициент общей полноты; α – коэффициент полноты ватерлинии; d – осадка судна, м; D – водоизмещение судна, т.

При отсутствии точных данных значения указанных величин можно получить по приближённым формулам:

$$J_y \approx 0,07 \cdot \frac{\alpha}{9,81} \cdot D \cdot L^2; \quad (27)$$

$$H_0 \approx \frac{\alpha^2 \cdot L^2}{14 \cdot C_B \cdot d}. \quad (28)$$

Помимо скорости движения судна и угла встречи с волной на интенсивность волнового воздействия влияют соотношения геометрических размеров судна и длины волны. При движении судна перпендикулярно гребню волны (встречно или попутно) изменение дифферента совпадает с углом

волнового склона $\gamma(t)$, если длина судна существенно меньше половины длины волны $2L \leq \lambda$. По мере роста отношения L/λ амплитуда дифферента судна уменьшается при неизменной амплитуде угла волнового склона. Аналогичный эффект уменьшения амплитуды угла крена в зависимости от отношения ширины судна к длине волны B/L реализуется при поперечном волнении. На ослабление качки также влияет осадка судна.

Другие геометрические соотношения устанавливаются при движении судна под некоторым углом φ к направлению бега волн. В этом случае амплитуда угла дифферента судна определяется продольной составляющей угла волнового склона, а амплитуда угла крена зависит от поперечной составляющей угла волнового склона [1, 2].

Заключение

Современные суда оснащены системой мониторинга параметров волнения моря, фиксирующей актуальные и предшествующие значения определяющих параметров волнения: высоту $h_{1/3}$ значительных волн; высоту $h_{3\%}$ максимальных волн (высота волн 3% обеспеченности: $h_{1/3} = 0,75h_{3\%}$); средний период волнения; период преобладающих волн (главная гармоника волнения, соответствующая пику его

спектра. На эту гармонику приходится максимум энергии волн); скорость и направления бега преобладающих волн; длину преобладающих волн.

Использование этих данных в совокупности с информацией о параметрах судна, введенной в бортовое вычислительное устройство в порту перед выходом в море, позволяет сформировать алгоритм расчёта динамических параметров судна в штормовых условиях: собственный период качки судна, критические значения амплитуды качки по крену и дифференту, безопасные скорость и курсовой угол по отношению к направлению распространения штормового волнения моря.

Полученные расчётные данные обеспечат информационную поддержку судоводителю по недопущению критических значений скорости судна, его курсового угла на волне, углов по крену и дифференту для сохранности груза и комфортных условий обитания экипажа (уменьшение вероятности морской болезни).

Технический уровень современных процессорных систем управления скоростью и курсом судов обеспечит реализацию предлагаемого алгоритма автоматического определения оптимальных курса и скорости судна в штормовых условиях, исключающих попадание его в резонанс с волнением моря, как при бортовой, так и при килевой качке. Эти данные могут быть использованы штурманом для управления судном в штормовых условиях.

Литература

1. Павленко Г. Е. Качка судов: учеб пособие для ВТУЗов. Л.: ГТИ ЛО, 1935. 312 с.
2. Павленко Г.Е. Теория и расчет продольной качки корабля. Л.: Изд-во ЛКИ, 1939. 52 с.
3. Ремез Ю.В. О выборе курса и скорости корабля при шторме. М.: Морской транспорт, 1957. 112 с.
4. Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А. Справочник по теории корабля: Ходкость и управляемость. Л.: Судпромгиз, 1960. 688 с.
5. Скороходов Д.А. Принципы безопасного маневрирования в штормовых условиях // Известия Санкт-Петербургского электротехнического университета (ЛЭТИ). 2009. №8. С. 9-14.
6. Скороходов Д.А., Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Стариченков А.Л. Управление движением водоизмещающих судов на переходе морем // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3-1 (45). С. 20-28.
7. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Анализ и перспективы развития скоростных судов // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 3-1 (41). С. 10-20.
8. Справочник капитана дальнего плавания / Л.Р.Аксютин, В.М.Бондарь, Г.Г.Ермолаев и др.; под ред. Г.Г.Ермолаева. М.: Транспорт, 1988. 248 с.
9. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Маринов М.Л., Турусов С.Н. Перспективы совершенствования судовых систем управления движением // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3-3 (45). С. 64-70.

References

1. Pavlenko G. E. Kachka sudov [Rolling of ships]: ucheb posobie dlya VTUZov. L.: GTI LO, 1935. 312 p.
2. Pavlenko G.E. Teoriya i raschet prodol'noj kachki korablya [Theory and calculation of the ship's longitudinal pitching]. L.: Izd-vo LKI, 1939. 52 p.
3. Remez YU.V. O vybere kursa i skorosti korablya pri shtorme [About the choice of the ship's course and speed in a storm]. M.: Morskoj transport, 1957. 112 p.
4. Vojtkunskij YA.I., Pershic R.YA., Titov I.A. Spravochnik po teorii korablya: Hodkost' i upravlyaemost' [Handbook of Ship Theory: Seaworthiness and Controllability]. L.: Sudpromgiz, 1960. 688 p.
5. Skorohodov D.A. Principy bezopasnogo manevrirovaniya v shtormovyh usloviyah [Principles of safe maneuvering in stormy conditions] // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo elektrotekhnicheskogo universiteta (LETI). 2009. №8. pp. 9-14.
6. Skorohodov D.A., Kaminsky V.Yu., Marinov M.L., Starichenkov A.L. Upravlenie dvizheniem vodoizmeshchayushchih sudov na perekhode morem [Traffic control of displacement vessels at sea crossing] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 3-1 (45). pp. 20-28.
7. Kaminsky V. Yu., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Analiz i perspektivy razvitiya skorostnyh sudov [Analysis and prospects for the development of high-speed vessels] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 3-1 (41). pp. 10-20.

8. Spravochnik kapitana dal'nego plavaniya [The handbook of the captain of a long voyage] / L.R.Aksyutin, V.M.Bondar', G.G.Ermolaev i dr.; pod red. G.G.Ermolaeva. M.: Transport, 1988. 248 p.
9. Kaminsky V. Yu., Skorohodov D.A., Marinov M.L., Turusov S.N. Perspektivy sovershenstvovaniya sudovykh sistem upravleniya dvizheniem [Prospects for improving ship traffic management systems] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 3-3 (45). pp. 64-70.

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

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

Скорородов 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

Никитин Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: morintex_spb@mail.ru

Nikolai V. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: morintex_spb@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 24.12.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 09.01.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 12.01.2024.

Научная статья

УДК 001.891.573

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.026>**Подводное автономное подруливающее устройство как способ обеспечения проводки судна в стесненных условиях**Бурылин Я.В.¹ y.burylin@gmail.com¹ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова.

Аннотация. Основой безопасной и эффективной проводки судна в стесненных условиях портовой акватории узостей, проливов, рек, шлюзов и доков является обеспечение пропульсивными и рулевыми установками судна его достаточной маневренности. Как правило крупнотоннажные грузовые суда, обеспечивающие 80% мирового грузооборота оборудованы одним винторулевым комплексом, расположенным на корме. Для повышения маневренности таких судов применяют буксиры-кантовщики в основных режимах работы «на битенг» или «на укол». Если акватория порта позволяет, то практически любое крупнотоннажное судно может быть безопасно поставлено к причалу с использованием четырех конвенционных буксиров-кантовщиков при допустимых для порта условиях окружающей среды. В случае, когда акватории порта недостаточно для вмещения судна и кантовщиков его буксиров, швартовка невозможна. В настоящей статье предлагается концепт подводного подруливающего устройства, крепящегося к днищу грузового судна. Такое устройство не требует дополнительной акватории для повышения мобильности судна и позволяет заводить суда в акватории, соизмеримые по ширине с шириной самого судна, что позволит повысить количество причальных мест на единицу площади портовой акватории и существенно повысить грузооборот порта.

Ключевые слова: безэкипажное судно, е-навигация, автоматическое управление, подруливающее устройство, буксир.

Для цитирования: Бурылин Я.В. Подводное автономное подруливающее устройство как способ обеспечения проводки судна в стесненных условиях, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 216—222. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.026

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.026>**Underwater autonomous thruster as a way to navigate a vessel in confined waters**Yaroslav V. Burylin¹ y.burylin@gmail.com¹Admiral F.F. Ushakov maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. The basis for safe and efficient navigation of a vessel in the cramped conditions of port waters such as narrow passages, straits, rivers, locks and docks is to ensure the vessel's propulsion and steering installations provide sufficient maneuverability. As a rule, large-capacity cargo ships, providing 80% of the world's cargo turnover, are equipped with one rudder complex located at the stern. To increase the maneuverability of such vessels, tilt tugs are used in the main modes of operation: "biting" or "punching". If the port water area allows, then almost any large-capacity vessel can be safely berthed using four conventional berthing tugs under environmental conditions acceptable for the port. In cases where the port water area is not sufficient to accommodate the vessel and its tugboats, mooring is impossible. This paper proposes a concept for an underwater thruster attached to the bottom of a cargo ship. Such a device does not require additional water area to increase the mobility of the vessel and allows ships to be launched in water areas comparable in width to the width of the vessel itself, which will increase the number of births per unit area of the port water area and significantly increase the port's cargo turnover.

Key words: unmanned vessel, e-navigation, automatic control, thruster, tug.

For citation: Yaroslav V. Burylin, Underwater autonomous thruster as a way to navigate a vessel in confined waters. Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 216—222. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.026

Введение

Целью развития портовой инфраструктуры всегда стоит повышение грузооборота. Достигается это повышением пропускной способности как портовой акватории, так и берегового сегмента. Пропускная способность портовой акватории зависит от количества причалов и скорости обработки судов как при проводке и швартовке, так и во время грузовых операций. Поскольку акватория порта как правило ограничена, количество причальных мест невозможно увеличивать за счет ее расширения. Необходимо повышать эффективную площадь, то

есть увеличивать количество причальных мест в уже существующей акватории. Это может достигаться путем более плотной застройки причальных сооружений, что неизбежно влияет на безопасность мореплавания в районе ввиду сокращения пространства для маневрирования. На рисунке 1 показаны причалы 23-30 внутренней гавани морского порта Новороссийск. На рисунке видно, что внутри каждой акватории между причалами находится только по одному судну ввиду того, что второе и все остальные суда не могут быть безопасно заведены и ошвартованы. Для безопасной швартовки судна необходимо пространство как для самого

швартуемого судна, так и для буксира-кантовщика, придающему судну дополнительную управляемость. Такое положение дел вызывает простой портовых и судовых мощностей снижение грузооборота и эффективности портовой инфраструктуры.

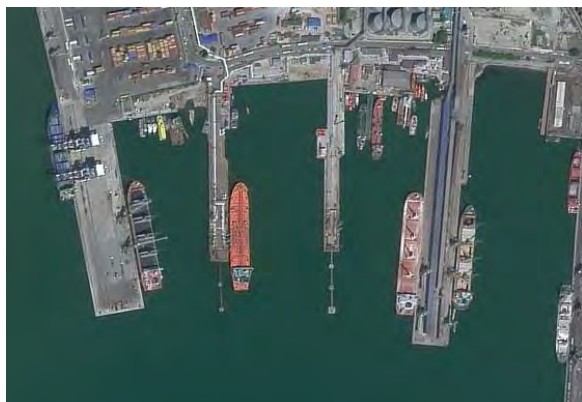


Рис. 1. Причалы порта Новороссийск.

В связи с этим, для повышения управляемости грузовых крупнотоннажных судов предлагается использовать автономное подводное подруливающее устройство (АПУ), способное крепиться к днищу судна в районе его носовой и кормовой оконечностей с помощью электромагнитной платформы. Это позволит швартовать судно в максимально стесненных условиях, соизмеримых с габаритами самого судна, однако потребует наличия нескольких дополнительных метров глубины акватории, что в условиях дефицита площади акватории развивающегося порта становится единственной оправданной экономически альтернативой.

1. Материалы и методы

В работе произведено 3-д моделирование предлагаемых концептов подруливающего устройства и вспомогательного транспортного средства. Для этого использовался «AutoCAD» - двух- и трёхмерная система автоматизированного проектирования и черчения.

Произведено моделирование захода в порт и постановка к причалу судна, использующего АПУ в качестве буксира. Для этого использовался Navi Trainer Professional 5000. Навигационный тренажер Navi-Trainer Professional 5000 предназначен для обучения и сертификации вахтенных офицеров, старших помощников, капитанов и лоцманов торговых и рыболовецких судов регистровой вместимостью 500 тонн и более; широко применяется для обучения и аттестации судоводителей маломерного флота. Тренажер соответствует требованиям Конвенции ПДМНВ-78 с поправками и требованиям модельных курсов IMO 7.01, 7.03, а также позволяет проводить обучение по программам, не упоминаемым в Конвенции. Тренажер NTPRO 5000 сертифицирован Министерством Транспорта РФ и норвежским классификационным обществом Det Norske Veritas.

2. Исходные данные проектирования АПУ

Для проектирования АПУ необходимо задаться мощностями буксиров, используемых в настоящее

время для проводки и швартовки крупнотоннажных судов в портах, подведомственных РосМорПорту.

В таблице 1 представлены мощностные характеристики буксиров для постановки судов к причалам 18-39 порта Новороссийск.

Таблица 1

Сведения о минимальных количестве и мощности буксиров для швартовочных операций судов в морском порту Новороссийск к причалам внутренней гавани и юго-восточного грузового района

№ причала	Минимальное количество буксиров и их минимальная мощность (киловатты)	
	при силе ветра до пяти баллов (до 10 метров в секунду)	при силе ветра пять и более баллов (10 метров в секунду и более)
	суда длиной от 190 до 220 метров	
18 - 19	2 x 2400	2 x 2400, 1 x 600
29-30	2 x 2400	2 x 2400, 1 x 600
39	2 x 2400	2 x 2400, 1 x 600
	суда длиной от 220 до 245 метров	
18 - 19	2 x 2400, 1 x 600	3 x 2400
29-30	2 x 2400, 1 x 600	3 x 2400
39	2 x 2400, 1 x 600	3 x 2400
	суда длиной от 245 до 270 метров	
18- 19	3 x 2400	4 x 2400
29-30	3 x 2400	4 x 2400
39	3 x 2400	4 x 2400

Из данных таблицы можно сделать вывод, что целесообразно проектировать АПУ мощностью 1200кВт для замены буксира мощностью 1350 кВт. Тогда для замены буксира мощностью 2400 кВт возможно использование два АПУ на одну условную точку приложения силы.

Далее предлагается задаться диаметром винта АПУ исходя из мощности двигателей.

$$K'_d = Dv_e \sqrt{\frac{\rho}{P_k}}; \quad n = \frac{v_e}{\lambda_e D};$$

$$\lambda_e = f(K'_d); \quad N_p = \frac{P_k v_e}{\eta_k}; \quad (1)$$

$$\eta_k = f(K'_d); \quad N_e = \frac{N_p}{\eta_e \eta_r},$$

где K'_d – коэффициент задания «упор-диаметр» для комплекса винт – насадка;

D – диаметр гребного винта, м;

v_e – скорость поступательного движения комплекса винт-насадка относительно воды, м/с;

ρ – плотность воды, кг/м³;

P_k – упор комплекса винт-насадка, кН;

η_e – относительная поступь комплекса винт-насадка;

η_k – коэффициент полезного действия комплекса винт-насадка;
 η_e – коэффициент полезного действия валопровода;
 η_r – коэффициент полезного действия редуктора;
 n – число оборотов винта, 1/с;
 N_e – мощность, развиваемая двигателем, кВт;
 N_p – мощность, подведенная к винту, кВт;
 По формулам (1) подбираются значения оптимального диаметра винта под желаемую мощность двигателя. Оптимальным диаметром винта АПУ для двигателя мощностью 1350кВт будет 2.2 м. Кроме того двигатели мощностью выше 1000 кВт морского исполнения слабо представлены на рынке. Таким образом можно принять решение о распределении мощности АПУ на два двигателя по 700 кВт каждый с оптимальным диаметром винта в 1.5м.

Существуют порты, для которых требования по мощности буксиров значительно ниже представленных в табл.1. Например в порту Керчь эксплуатируются буксиры, общая мощность которых менее 900кВт. Это позволяет заложить в проект возможность построения одновинтовой АПУ с оптимальным диаметром 1.7м. Поскольку АПУ должна иметь возможность автономно перемещаться, одновинтовое исполнение конструкции должно быть доработано вспомогательными винтами. Это должно быть сделано потому, что главный винт не стабилизирован и будет вращать корпус АПУ, так как он связан со статором мотора. Предлагается в дополнение к главному винту оборудовать АПУ двумя вспомогательными винтами по обе стороны от главного. Движение АПУ на свободном ходу будет осуществляться за счет вспомогательных винтов. Руление будет осуществляться за счет изменения оборотов винта соответствующей направлению поворота стороны АПУ.

Таблица 2
Сведения о минимальных количестве и мощности буксиров для швартовных операций судов в морском порту Керчь

Длина судна(метры)	Минимальные количество буксиров и их минимальная мощность в кВт Швартовка и отшвартовка
От 60 до 100	1 x 220
От 100 до 130	1 x 220 и 1 x 880
Более 130	2 x 880
Более 160	3x880

Двухвинтовые АПУ могут обойтись без вспомогательных винтов для движения на свободном ходу в том случае, если используются главные винты разной направленности шага, вращающиеся в противоположных направлениях для создания потока воды единой направленности. Но даже в этом случае потребуется система интеллектуальной стабилизации вращения корпуса путем регулирования оборотов каждого из винтов. Руление двухвинтовой АПУ будет затруднено несмотря на то, что можно регулировать обороты винтов независимо,

тем самым создавая вращательный момент вокруг вертикальной оси. Под свободным ходом подразумевается маневрирование АПУ непосредственно у корпуса судна для занятия позиции крепления к днищу судна при помощи магнитной платформы.

Для обоих вариантов исполнения АПУ, как с одним, так и с двумя винтами необходимо предусмотреть возможность транспортировки АПУ к судну на входе в порт или на якорную стоянку, поскольку движение на свободном ходу требует значительной стабилизации АПУ ввиду особенностей формы ее конструкции. В качестве такого транспорта предлагается использовать катамаран с пластинами для крепления магнитных платформ АПУ. В процессе следования транспорта, груженого АПУ, они сами могут выступать в роли движителей. Когда транспорт свободен, он использует свой движитель для передвижения.

Отталкиваясь от мощности моторов и продолжительности работы АПУ для швартовки судна к причалам 23-28 порта Новороссийск можно заключить, что необходимо общей массой 8.4т.

Для обеспечения нулевой плавучести необходимо предусмотреть 10 м³. воздушные ящики. Для обеспечения возможности погружения и всплытия необходим поршень для сжатия воздуха.

В нормальной ситуации при штатной эксплуатации судна при постановке к причалу буксиры придают судну преимущественно поперечное ускорение, поскольку продольное ускорение сообщают судну его главные движительные системы. Однако, буксиры также могут использоваться для буксировки неисправных судов и тогда им приходится брать на себя функции главных двигателей судна. Для обеспечения возможности сообщать судну не только поперечное ускорение необходимо предусмотреть поворотный механизм для вращения корпуса АПУ относительно магнитной платформы вокруг вертикальной оси. Механизм должен быть достаточно мощным, чтобы выдерживать нагрузки, соответствующие мощности АПУ.

3. Моделирование 3-д объектов

Исходя из выбранных условий были смоделированы одно и двухвинтовые АПУ, а также транспорт, позволяющий АПУ достигать точки rendez с судном. Концепты устройств представлены на рисунках 2-4.

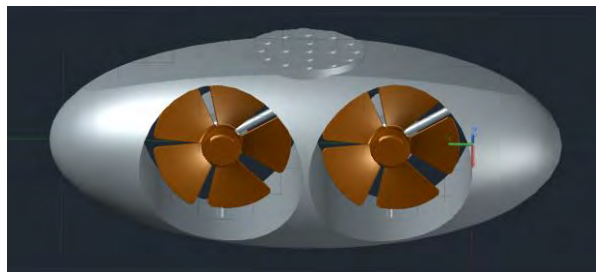


Рис. 2. Двухвинтовая АПУ

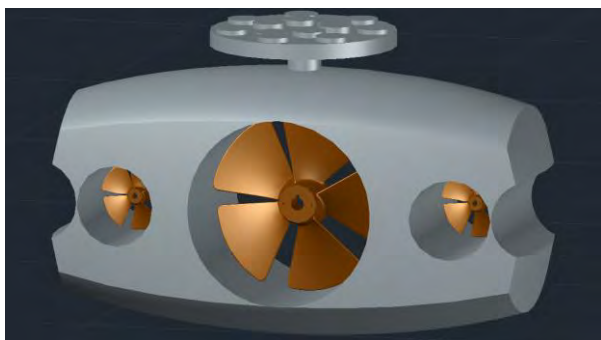


Рис. 3. Одновинтовая АПУ

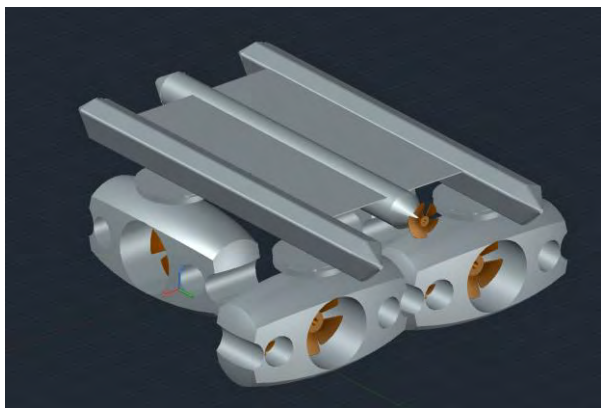


Рис. 4. Транспорт АПУ

Принципиальная схема двухвинтовой АПУ представлена на рисунке 5. На рисунке показано, что АПУ оборудована двумя винтами по 1.5м диаметром каждый, двумя моторами по 700кВт каждый, двумя отсеками с элементами питания, рассчитанными для питания всех модулей и систем АПУ в течении двух часов.

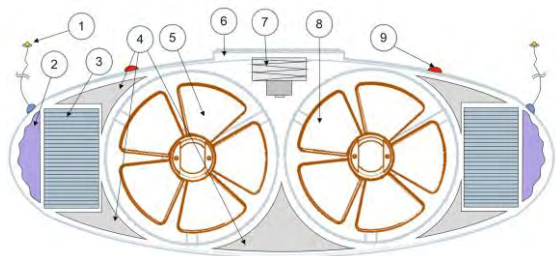


Рис.5. Принципиальная схема устройства АПУ
1-буй-антенна, 2-емкость плавучести изменяемой геометрии, 3-элементы питания, 4-баки плавучести, 5-мотор, 6-магнитная платформа, 7-поворотный механизм, 8-винт, 9-видеокамера с фонарем.

Объемы баков плавучести рассчитаны для придания АПУ нулевой плавучести. Погружение и всплытие осуществляется за счет емкостей изменяемой геометрии из расчета погружения на глубину до 20 метров. Поворотный механизм и магнитная платформа, диаметром 1.3м. рассчитаны для удержания АПУ на корпусе судна с помощью держащей силы электромагнитов в заданной ориентации относительно корпуса судна с учетом усилия, развиваемого винтами АПУ. Для управления АПУ предусмотрен радиоканал частот УКВ, для пропуска которого под воду предусмотрена антенна-буй и кабель длиной 30м.

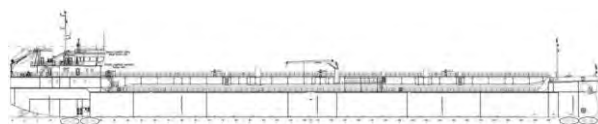


Рис.6. Расстановка АПУ по корпусу судна.

На рисунке 6 показана расстановка АПУ под корпусом судна, длиной 150м. Видно, что АПУ незначительно увеличивают габариты судна относительно его собственных размеров.

Заводка АПУ под корпус судна и их крепление (также как и отдача АПУ и их отход от судна) должна осуществляться квалифицированным специалистом непосредственно у корпуса судна посредством радиоканала с мобильного устройства типа планшета или ноутбука. Для удобства заводки АПУ оборудованы видеокамерами и фонарями. Для аварийного подъема АПУ из-под воды или со дна используется проводник, с одной стороны прикрепленный к бую, отдающемуся от корпуса АПУ и всплывающему в аварийной ситуации по команде оператора либо по достижении определенной глубины. С другой стороны, проводник прикреплен к стальному тросу, который свободно разматывается на длину до 100м и за который можно поднять АПУ. Управление АПУ в процессе проводки и швартовки осуществляется лоцманом или удаленным оператором посредством радиоканала с мобильного устройства или поста дистанционного управления.

4. Эксперименты

Было произведено моделирование проводки и швартовки судна типа балкер длиной 182,6м., шириной 22,6м., осадкой 7,7м. и водоизмещением 23565 тонн в балласте при помощи четырех двухвинтовых АПУ к причалу 23 порта Новороссийск. Две АПУ были размещены на баке и две на корме судна. Результаты эксперимента приведены на рисунках 7-9.



Рис.7. Проводка и швартовка судна в порту Новороссийск при помощи АПУ.

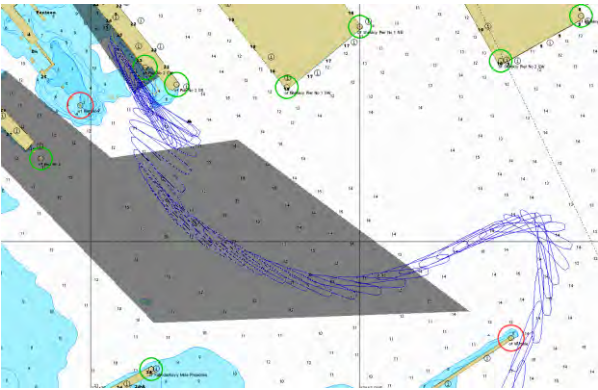


Рис.8. Раскантовка и швартовка судна к причалу №23 порта Новороссийск при помощи АПУ.



Рис.9 Силы от ВРК судна и АПУ, действующие на корпус судна.

В результате эксперимента было выявлено, что пропульсивная обеспеченность судна, оснащенного АПУ является достаточной для безопасного захода судна и постановки к причалу. По эффективности АПУ не уступали обычным буксирам с тяговым усилием до 40 тонн. АПУ применялись для придания судну дополнительного поперечного ускорения, продольное ускорение судну сообщал судовой ВРК. АПУ эффективно участвовали в процессе раскантовки судна по направлению к причалу после входа во внутреннюю гавань порта. АПУ отлично справились с прижатием судна к причалу во время швартовных операций.

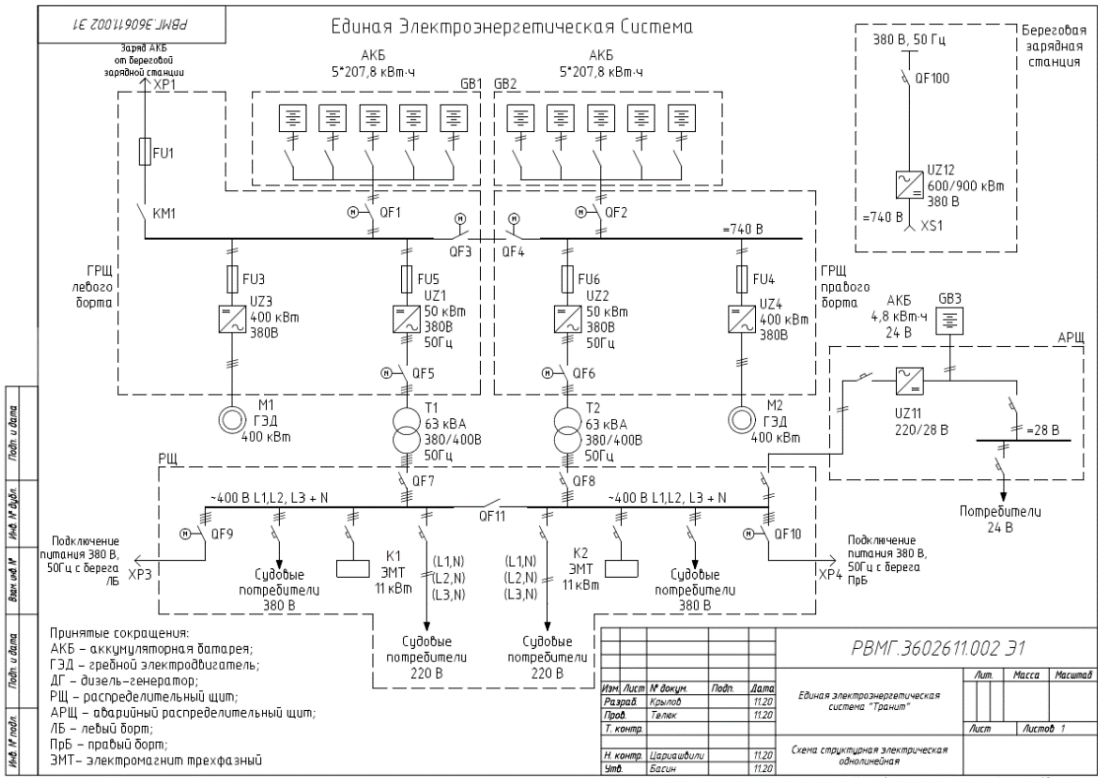


Рис.10. Схема включения аккумуляторов в судовую электроцепь.

На рисунке 10 показана спроектированная электросистема для питания моторов и систем АПУ.

Заключение

По результатам расчетов и экспериментов можно обозначить преимущества и недостатки АПУ при их применении в проводке, буксировке и швартовке судов в морских и речных портах.

Среди недостатков АПУ можно выделить следующие:

1. Ввиду конструкции АПУ сложно удерживать скорость более одного узла на свободном ходу. Стыковка и примагничивание АПУ к корпусу судна по

этой причине должно осуществляться при скорости судна не более одного узла относительно воды.

2. При планировании швартовных операций необходимо закладывать дополнительные 3 метра глубины у причала, что может потребовать выполнение дноуглубительных работ.

Достоинства предлагаемых АПУ:

1. За счет повышения эффективности использования площади акватории порта значительно повышают грузооборот порта.

2. За счет снижения навигационной нагрузки в стесненной акватории и автоматизации процессов

судовождения повышают навигационную безопасность.

3. За счет возможности дистанционного управления пропульсивными механизмами судна соответствуют мировым тенденциям по автоматизации и автономизации судовождения.

4. За счет использования электродвижения и отсутствие выбросов в атмосферу могут считаться экологичным видом транспорта.

5. Экономически целесообразны по причине отсутствия издержек на содержание экипажа, нет необходимости устанавливать радионавигационное оборудование как на обычных буксирах.

6. Поскольку эксплуатация осуществляется в основном в подводном режиме АПУ не подвержены

воздействию ветра и волнения, что снижает стоимость электроэнергии при их использовании.

7. Возможна разработка специализированных АПУ для ледовой обстановки, поскольку предлагаемый способ буксировки предлагает подледное расположение АПУ, как следствие отсутствие необходимости закладки в конструкцию взаимодействия со льдом и меньшую стоимость.

Учитывая соотношение приведенных преимуществ и недостатков, можно заключить, что предлагаемые АПУ могут найти широкое применение в развивающейся инфраструктуре современного порта.

Литература

1. Allianz Global Corporate & Specialty SE «Safety and shipping review». 2018. — 48 p.
2. Пинский А.С. Е-Навигация и безэкипажное судовождение. Транспорт РФ. 2016. № 4 (65). С. 50–54.
3. Carlson D. F., Fürsterling, A.L. Vesterled, M. Skovby, S. Sejer Pedersen, C. Melvad, S. Rysgaard. An affordable and portable autonomous surface vehicle with obstacle avoidance for coastal ocean monitoring. HardwareX, 2019. № 6. – P. 59–78.
4. Baldauf, M., Benedict, K., Fischer, S., Gluch, M., Kirchhoff, M., Klaes, S., Schroder-Hinrichs, J.U., Meibner, D., Fielitz, U., Wilske, E. e-Navigation and situation-dependent maneuvering assistance to enhance maritime emergency response. WMU Journal of Maritime Affairs, 2011. – P. 209–226.
5. Bayat, B. N. Crasta, A. Crespi, A. M. Pascoal, A. Ijspeert. Environmental monitoring using autonomous vehicles: a survey of recent searching techniques. Current Opinion in Biotechnology, 2017. № 45. - P. 76–84.
6. Matthew D., Alistair G., James U. Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA), December 2-4, 2009, Sydney, Australia. An Autonomous Surface Vehicle for Water Quality Monitoring.
7. Narkiewicz, J. Autopilot with adaptive vessel modelling/ J.Narkiewicz, G.Świętoń. Annual of navigation. – 2009. – № 15. – С. 93–100.
8. L. Barbieri, F. Cucinotta, A. Gallo, F. Bruno, M. Muzzupappa, N. Penna, R. Gaudio. Design and Simulation of the Hull of a Small-Sized Autonomous Surface Vehicle for Seabed Mapping// Springer Nature Switzerland AG, 2020. – P. 422–431.
9. Патент №2021612609 Российская Федерация, МПК В63Н 25/04 (2006.01), G05В 13/04 (2006.01), G08G 3/00 (2006.01). Способ автоматической проводки судна: № 2021611569: заявл. 09.02.2021: опубл.19.02.2021/ Бурылин Я.В., Кондратьев А.С., Попов А.Н.; заявитель ГМУ. – 4 с.
10. Гринек А.В., Фищенко А.М., Бойчук И.П., Перельгин Д.Н., Савостеенко Н.В. Конечно-элементное моделирование судового генератора. Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4-4 (50). С. 92-97.
11. Burylin Y.V. Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes. / International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021). Journal of Physics: Conference Series, 2021. №2061. – P. 1–7.
12. Burylin Y.V. A method for constructing a small-sized unmanned vessel and its automatic wiring. International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021). Journal of Physics: Conference Series, 2021. Burylin Y 2018 Identification of a non-linear ship motion model and adaptive trajectory control (dissertation abstract) (Novorossiysk: IAMU) p 24.
13. Kondratyev A. I., Burylin Y. V. The method for automatic control of a ship with directional instability (Journal of Physics: Conference Series vol 2061) 2021 pp 1–7.
14. Astrein V. V., Kondratyev S.I. Selection of optimal forecasting models in the navigation safety decision support system (Journal of Physics: Conference Series vol 2061) 2021 pp 1–7.
15. V. V. Astrein, Kondratyev S.I. Multicriteria assessment of optimal forecasting models in decision support systems to ensure the navigation safety (Journal of Physics: Conference Series vol 2061) 2021 pp 1–7.
16. Tulchinskii V. V., Tulchinskii V. I. 2021 Automatic assistance system for visual control of targets (Journal of Physics: Conference Series vol 2061) 2021 pp 1–7.
17. Grinek A. V. Software and hardware complex for solving problems of autonomous navigation. Marine intellectual technologies Issue 4, Page 68-74, 2022 Part 1.

References

1. Allianz Global Corporate & Specialty SE «Safety and shipping review». 2018. — 48 p.
2. Pinskiy A. S. E-Navigatsiya i bezekipazhnoe sudovozhdenie [E-Navigation and unmanned navigation]. Transport RF. 2016, №4 (65), S. 93-100.
3. Carlson D. F., Fürsterling, A.L. Vesterled, M. Skovby, S. Sejer Pedersen, C. Melvad, S. Rysgaard. An affordable and portable autonomous surface vehicle with obstacle avoidance for coastal ocean monitoring. HardwareX, 2019. № 6. – P. 59–78.
4. Baldauf, M., Benedict, K., Fischer, S., Gluch, M., Kirchhoff, M., Klaes, S., Schroder-Hinrichs, J.U., Meibner, D., Fielitz, U., Wilske, E. e-Navigation and situation-dependent maneuvering assistance to enhance maritime emergency response. WMU Journal of Maritime Affairs, 2011. – P. 209–226.

5. Bayat, B. N. Crasta, A. Crespi, A. M. Pascoal, A. Ijspeert. Environmental monitoring using autonomous vehicles: a survey of recent searching techniques. *Current Opinion in Biotechnology*, 2017. № 45. - P. 76–84.
6. Matthew D., Alistair G., James U. Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA), December 2-4, 2009, Sydney, Australia. An Autonomous Surface Vehicle for Water Quality Monitoring.
7. Narkiewicz, J. Autopilot with adaptive vessel modelling/ J.Narkiewicz, G.Świętoń. *Annual of navigation*. – 2009. – № 15. – С. 93–100.
8. L. Barbieri, F. Cucinotta, A. Gallo, F. Bruno, M. Muzzupappa, N. Penna, R. Gaudio. Design and Simulation of the Hull of a Small-Sized Autonomous Surface Vehicle for Seabed Mapping// Springer Nature Switzerland AG, 2020. – P. 422–431.
9. Способ автоматической проводки судна [Automatic pilotage method]: пат. 2021612609 Рос. Федерация, Бурлин Я.В., Кондратьев А.С., Попов А.Н.; заявитель/ патентообладатель/ FGBOU VO «ГМУ имени адмирала Ф.Ф.Ушакова» no. 2021612609: declared. 09.02.2021: published.: 19.02.2021.
10. Grinek A.V., Fishchenko A.M., Boychuk I.P., Pereygin D.N., Savosteenko N.V. Finite element simulation of marine generators. *Marine intelligent technologies*. 2020, № 4-4 (50). S. 92–97.
11. Burylin Y.V. Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes. / International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021). *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. №2061. – P. 1–7.
12. Burylin Y.V. A method for constructing a small-sized unmanned vessel and its automatic wiring. International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021). *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. Burylin Y 2018 Identification of a non-linear ship motion model and adaptive trajectory control (dissertation abstract) (Novorossiysk: IAMU) p 24.
13. Kondratyev A. I., Burylin Y. V. The method for automatic control of a ship with directional instability (*Journal of Physics: Conference Series vol 2061*) 2021 pp 1–7.
14. Astrein V. V., Kondratyev S.I. Selection of optimal forecasting models in the navigation safety decision support system (*Journal of Physics: Conference Series vol 2061*) 2021pp 1–7.
15. V. V. Astrein, Kondratyev S.I. Multicriteria assessment of optimal forecasting models in decision support systems to ensure the navigation safety (*Journal of Physics: Conference Series vol 2061*) 2021 pp 1–7.
16. Tulchinskii V. V., Tulchinskii V. I. 2021 Automatic assistance system for visual control of targets (*Journal of Physics: Conference Series vol 2061*) 2021 pp 1–7.
17. Grinek A. V. Software and hardware complex for solving problems of autonomous navigation. *Marine intellectual technologies Issue 4, Page 68-74, 2022 Part 1*.

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

Бурлин Ярослав Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры судовождения, ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 93, проспект Ленина, Новороссийск, 353918, Российская Федерация. e-mail: y.burylin@gmail.com

Yaroslav V. Burylin, PhD (Eng), Assistant Professor of the Department of Navigation, Admiral Ushakov maritime State University, 93, Lenin Avenue, Novorossiysk, 353918, Russian Federation. e-mail: y.burylin@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 16.01.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.02.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 22.02.2024.

Научная статья

УДК 504.062

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.027>

Геоэкологическое управление морехозяйственными комплексами акваторий Северного морского пути

Даргис Е.А.¹ dargis72@mail.ru, Кузнецова Е.Ю.¹ helhena@mail.ru, Латухов¹ latukhovsv@gumrf.ru,
Поляков А.В.¹ elenapol58@mail.ru

¹Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова.

Аннотация. Одним из базовых условий развития перевозок по Северному морскому пути сегодня выступает реализация масштабных инфраструктурных проектов морехозяйственного комплекса, создание и функционирование которых должно сопровождать проведение адекватного объема системных исследований экологических факторов, разработка и совершенствование методологии комплексной оценки воздействия на окружающую среду. Задача рационального использования природных ресурсов прибрежной зоны связана с разработкой геоэкологических принципов управления развитием и функционированием морехозяйственного комплекса акваторий Северного морского пути с учетом антропогенного воздействия на приморские, береговые и прибрежные экосистемы. Общепринятая методология комплексной оценки воздействия морехозяйственного комплекса на акватории и береговые территории северного морского пути отсутствует. Существующие методики воздействия объекта водного транспорта не в полной мере отражают особенности воздействия морехозяйственного комплекса и часто сводятся к варианту компенсации за нанесенный ущерб. Решение геоэкологических задач сопряжено с использованием обширного объема данных, в связи с чем целесообразно применение геоинформационных систем и методов математического моделирования физических процессов функционирования экологических систем. Авторами обосновываются подходы для получения интегральных количественных оценок экологического состояния окружающей среды и адаптивных ответов экологических систем на техногенное воздействие, что при реализации их в рамках геоэкологического управления морехозяйственным комплексом внесет весомый вклад в решение проблемы обеспечения долговременной и устойчивой эксплуатации морских ресурсов с учетом стратегического планирования социально-экономического развития береговых территорий.

Ключевые слова: Арктика, Северный морской путь, морехозяйственный комплекс, геоэкологическое управление, экология, прибрежная зона.

Для цитирования: Даргис Е.А., Кузнецова Е.Ю., Латухов С.В., Поляков А.В. Геоэкологическое управление морехозяйственными комплексами акваторий Северного морского пути. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 223—233. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.027

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.027>

Geoecological management of marine complexes in the waters of the Northern Sea Route

Evgeniy A. Dargis¹ dargis72@mail.ru, Elena Y. Kuznetsova¹ helhena@mail.ru
Sergey V. Latukhov¹ latukhovsv@gumrf.ru, Alexander V. Polyakov¹ elenapol58@mail.ru
¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

Abstract. One of the main conditions for the development of transportation along the Northern Sea Route today is the implementation of infrastructure projects of the marine economic complex. It is necessary to have an adequate volume of systematic studies of environmental factors, the development and improvement of a methodology for comprehensive environmental impact assessment. The task of rational use of natural resources of the coastal zone is connect with the development of geoecological principles for managing the development and functioning of the marine complex of the waters of the Northern Sea Route. There is no generally accepted methodology for a comprehensive assessment of the impact of the marine complex on the waters and coastal territories of the Northern Sea Route. The existing methods of impact of a water transport facility do not reflect the specifics of the impact of the marine complex and are often reduce to a compensation option for the damage caused. Solving geo-ecological problems involves the use of a large amount of data, and therefore it is advisable to use geo-information systems and mathematical modeling methods. The authors substantiate approaches to obtaining comprehensive quantitative assessments of the ecological state of the environment and the reactions of ecological systems to man-made impacts, which will make a significant contribution to solving the problem of ensuring long-term and sustainable exploitation of marine resources, taking into account strategic planning of socio-economic development of coastal territories.

Key words: Arctic, Northern Sea Route, marine management complex, geoecological management, ecology, coastal zone.

For citation: Evgeniy A. Dargis, Elena Y. Kuznetsova, Sergey V. Latukhov, Alexander V. Polyakov, Geoecological management of marine complexes in the waters of the Northern Sea Route. Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 223—233. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.027

Ведение

Сегодня российская Арктика продолжает оставаться ареной стремительного экономического развития, реализации масштабных инфраструктурных проектов мирового уровня, и для этого в РФ уже создан прочный и долгосрочный фундамент. Помимо этого, ведется разработка новых документов государственного уровня, призванных повысить эффективность экономического и социального развития Арктической зоны (АЗ). Создание и модернизация универсальных перегрузочных комплексов в арктической прибрежной зоне, гарантирующих устойчивость связей между основными магистралями транспортной сети – Северным морским путем (СМП) и Транссибирской железнодорожной магистралью (Транссибом), требует особого внимания к организации управления морехозяйственным комплексом (МХК) акваторий СМП в целом.

Каждая береговая зона имеет свою структуру, стратегию развития и экологический потенциал, которые должны быть учтены при управлении морехозяйственной деятельностью. Комплексное управление МХК решает следующие основные задачи: нахождение оптимального баланса между видами морехозяйственной деятельности в береговой и прибрежной зоне, установление приоритетов развития различных производств, устранение конфликтности и несовместимости морехозяйственных отраслей, обеспечение долговременной и устойчивой эксплуатации морских ресурсов с учетом стратегического планирования социально-экономического развития береговых территорий.

МХК прибрежной АЗ включает всю, в соответствии с современным определением, совокупность взаимодействующих отраслей экономики, действующих в акватории морей и на их побережьях и оперирующих ресурсами акваторий. В него входят: шельфовая добыча; судоходство и судостроение; рыболовство и марикультура; туризм в приморских зонах; порты и припортовая промышленность; эксплуатация морских трубопроводов и трансакваториальное сообщение; обеспечение деятельности и базирования военного морского флота.

Управление МХК акваторий СМП представляет собой элемент, функцию организованных систем различной природы (биологических, социальных, технических, экологических) обеспечивающую сохранение их определенной структуры, поддержание режима функционирования, реализацию программы, цели деятельности. В области геоэкологического управления на первый план выступает проблема рационального природопользования, те проблема управления МХК с учетом его антропогенного воздействия на приморские, береговые и прибрежные территории АЗ РФ.

В настоящее время общепринятая методология комплексной оценки воздействия МХК на соответствующие акватории и прибрежные зоны (ПЗ) СМП отсутствует. Однако, государственная политика в области экологического развития РФ предусматривает, одной из приоритетных целей, необходимость разработки и совершенствования

методологии комплексной оценки воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду (ОС), а также создание нормативно-правовой базы для стратегической экологической оценки [1].

Разработка методов и выбор подходов к получению интегральных количественных: оценок экологического состояния ОС в зонах размещения МХК акваторий СМП, а также адаптивных ответов экологических систем на техногенное воздействие является весомым элементом для обеспечения долговременной и устойчивой эксплуатации морских ресурсов с учетом стратегического планирования социально-экономического развития береговых территорий.

1. Развитие транспортной инфраструктуры и промышленных объектов морехозяйственного комплекса акваторий СМП

Реализация масштабных инфраструктурных портовых проектов наряду с грузовой базой, развитием ледокольной проводки и судостроения является важнейшим условием развития перевозок по СМП [2]. Внимание сегодня уделено развитию Архангельского и Мурманского транспортных узлов, порта «Сабетта», новых специализированных терминалов, а также строительству железнодорожных магистралей, обеспечивающих выход грузов из промышленных районов страны к морским портам СМП (рис 1). В настоящее время в Арктике реализуется 170 инвестпроектов, с общий объем инвестиций более 110 млрд рублей.

Госдумой в первом чтении был принят проект федерального закона о Северном завозе, который заново ввел это понятие в законный оборот. Будут определены категории товаров доставки Северного завоза и приоритетность их поставки. Программа субсидируемых каботажных перевозок, которая была начата с единичного рейса лихтеровоза «Севморпуть», сейчас нацелена на создание регулярного сообщения между арктическими портами [3].

В новых геоэкономических условиях Архангельский регион остался перспективным для реализации инфраструктурных проектов (рис.1). Текущий план развития Архангельского транспортного узла, предусматривает развитие морской, портовой, подъездной транспортной и инженерной инфраструктуры, обновление ледокольного флота потребует и обеспечения безопасности судоходства в акватории. Будут проведены дноуглубительные работы в заливе Белого моря морского порта Архангельск. Утверждены планы строительства морского терминала для отгрузки свинцово-цинкового концентрата на архипелаге Новая земля. Предусмотрены мероприятия по реконструкции береговой инфраструктуры стоянки морских спасательных судов в Архангельске.

Развитие Мурманского транспортного узла – кроме основного запланированного строительства угольного терминала «Лавна» на западном берегу Кольского залива, предусматривает строительство железной дороги и подъездных путей к порту, разрабатываются планы поэтапного развития существующего морского торгового порта и создания морского терминала для перевалки рыбопродукции. Мощность терминала «Лавна» составит 18 млн тонн.



Рис. 1. Развитие транспортных и инфраструктурных портовых проектов (по материалам [3])

Уникальным перевалочным хабом для грузов, следующих по СМП в западном направлении, а в перспективе – и в восточном вследствие своих географических и климатических особенностей становится акватория Баренцева моря. В настоящее время акватория уже используется для вывоза углеводородных ресурсов с шельфовых месторождений ЯНАО и Красноярского края.

При модернизации Мурманского порта для увеличения отгрузок по СМП продукции «Норильского Никеля» планируется удлинение железнодорожных путей на терминале, расширение парка платформ и техники, а также приобретение дополнительного кранового оборудования.

Особую значимость сегодня приобретают портовые проекты и в Восточной Арктике [3] (рис.1).

Завершены работы по объекту в районе Анадыря, поселке Угольные Копи, реализуются мероприятия непосредственно в порту Анадырь. Планируется переправа в поселке Беринговский для увеличения мощности угольного терминала на 1,5 млн тонн в год.

Предполагается реализация ряда инфраструктурных проектов в Восточной Арктике для развития грузопотока по СМП не только в западном направлении, но и в восточном. Развитию портовой инфраструктуры восточной части СМП будет способствовать и добыча сырья в регионе, в том числе СПГ.

Запуск проекта «Арктик СПГ-2» в Обской губе, предусматривающий строительство трех технологических линий общей мощностью около 20 млн тонн СПГ и до 1,6 млн тонн стабильного газового конденсата в год, начнется процесс подключения технологической линии к береговой инфраструктуре с последующим запуском производства СПГ.

Начало перевозок СПГ по восточному маршруту на круглогодичной основе окончательно превратит СМП в международный транспортный коридор.

На полуострове Камчатка и в Мурманской области введены в строй новые морские перегрузочные комплексы, которые должны увеличить оборачиваемость газозовозов с высоким арктическим классом и обеспечить ритмичные

отгрузки СПГ. Каждый комплекс обеспечит ежегодную перевалку СПГ в объеме более 21 млн тонн, для увеличения перевалочных мощностей предусмотрены резервы.

Для строительства нового угольного терминала «Енисей», предназначенного для вывоза угля с Сырадасайского месторождения, предполагается создание новой инфраструктуры. Длина дамбы нового терминала (приказом Минтранса включен в границы порта Диксон) составит почти 1,5 км, первая очередь причала, которую планируется построить летом 2023 года, – 129 метров. Впоследствии причал будет удлинен до 300 метров и сможет принимать суда класса Rapana и крупнее. Глубина подхода составит 19 метров.

Будут проведены дноуглубительные работы в акваториях строящихся объектов.

В июне 2022 года была актуализирована грузовая база проекта перспективной железнодорожной магистрали Обская – Салехард – Надым – Северный широтный ход (СШХ), проект, получивший рабочее название «СШХ-2», предполагает вовлечение существующей железнодорожной инфраструктуры ПАО «Газпром» (572 км линии Обская – Карское) и также создание нового железнодорожного участка протяженностью 172 км до границы порта Сабетта.

Комплексных исследований параметров освоения и логистического обеспечения минерально-сырьевой базы полуострова Ямал, включают разработку оптимальной схемы транспортировки жидких углеводородов, частично с использованием инфраструктуры проекта «СШХ-2».

Реализация арктического мегапроекта России в составе порта Индига – железной дороги Индига – Сосногорск, обеспечит выход железнодорожного сообщения на СМП. Длина магистрали Сосногорск – Индига составит 559 км, проектная мощность – 67 млн тонн, пропускная способность – 122 пары поездов в сутки [3].

Таким образом, на базе существующего МХК акваторий СМП модернизируются существующие и создается ряд новых объектов МХК, включающие производственные комплексы, опорные

логистические центры, терминалы для перевалки грузов с СМП в адрес Транссиба и наоборот. Очевидно, порты и портовые сооружения, ж/д станции с подъездными путями, береговые терминалы и прибрежные терминалы нефтегазового промышленного комплекса, бункеровочные станции и другие объекты инфраструктуры МХК, дополняемые плавучими объектами, обслуживающими работу МХК и осуществляющими доставку и вывоз грузов, относятся к источникам антропогенного воздействия и загрязнения ПЗ АЗ РФ.

Следует отметить особую экологическую хрупкость и неустойчивость экологических арктических систем, связанную в первую очередь с климатическими условиями региона.

Суровость арктического климата с частыми переходами температуры через 0 °C в весенне-летнее и летне-осеннее время обуславливает интенсивное проявление процессов морозного выветривания коренных пород, на берегах происходят преимущественно денудационные процессы. Существенное рельефообразующее значение ПЗ имеют волны зыби. Наличие сгонно-нагонных изменений уровня моря, при которых довольно широко развитие получают осушки.

В целом, как на западе, так и на востоке АЗ РФ, средняя и внешняя части рельефа сложены тонкодисперсным материалом, благоприятным для сорбирования различного рода загрязнителей. Осадки, накапливающиеся на дне северных морей, не претерпевают существенных изменений, т. е. химические и биохимические процессы в условиях холодноводности замедлены. Донные осадки впитывают в себя большое количество загрязняющих веществ, поступающих в моря, что вызывает их активное накопление.

Еще одна гидрологическая особенность ПЗ АЗ РФ характерна тем, что в отрицательных формах донного рельефа возникают зоны «затишья», т. е. зоны малых скоростей течений, способствующих отложению осадочного материала, и загрязнителей.

Анализ ледового режима ПЗ показывает, что лед является важным транспортирующим фактором в переносе загрязнителей. С сибирской ПЗ дрейфующий лед уносит загрязнители в открытый океан и далее на запад в пролив Фрама.

Берега акваторий СМП имеют свои особенности, отличающие их от берегов других океанов. Широкое распространение в Российской Арктике получили термоабразионные берега – море Лаптевых, Восточно-Сибирское море, средние скорости термоабразии наблюдаются на южном побережье о. Большого Ляховского, м. Крестовском, о. Новая Сибирь, на побережье Якутии в районе Ойгосского Яра. За 5-6 тыс. на некоторых участках береговая линия отступила от 10 до 50 км. В условиях возможного повышения уровня моря термоабразионные берега, будут еще более интенсивнее разрушаться, превращаясь в мощные источники питания осадочного материала. Глобальное потепления климата и сопутствующее ему сокращение зоны вечной мерзлоты приведет к резкому усилению процессов абразии [4].

Суть проблемы обеспечения экологической безопасности ПЗ акваторий СМП заключается прежде всего в сложности оценки антропогенного

загрязнения, вносимого при эксплуатации и развитии МХК, которая, в свою очередь, связана с большой разнородностью и распределенностью воздействия на хрупкие северные экосистемы.

2. Геоэкологический подход в управлении развитием и функционированием морехозяйственных комплексов

Наибольшая нагрузка на прибрежные экосистемы акваторий СМП создается объектами береговых МХК, задача регулирования, эксплуатации ресурсов и рационального их использования связана непосредственно с разработкой геоэкологических принципов управления развитием и функционированием МХК конкретных территорий. Успешная реализация этого направления во многом определяется устойчивым развитием МХК и решением проблем комплексного управления ими на государственном и региональном уровнях. В научной литературе МХК (рис.2.) понимается как территориальная совокупность всех, характерных для данной территории, видов экономической деятельности, прямо или косвенно связанных с использованием ресурсов Мирового океана [5].



Рис. 2. Схема морехозяйственного комплекса

В настоящее время наряду с термином МХК для обозначения морских хозяйств различных уровней сложности и разных по характеру экономико-графических процессов, явлений и закономерностей, а также разным уровням сопряжения между элементами структуры используются различные термины (рис.3).

Портовый комплекс – сочетание близко расположенных портов, для которых характерно сходство географического положения и наличие тесных взаимосвязей (совместное использование гидротехнических сооружений, подходов каналов, акваторий, судоремонтной базы, навигационные, береговые и прочие службы).

Портово-промышленный комплекс (ППК) – определяется как взаимообусловленное сочетание морских портов, промышленных предприятий, приморских поселений и социально-

производственной инфраструктуры, размещённых в береговой зоне.

Акваториально-территориальный хозяйственный комплекс (АТХК) состоит из 3-х звеньев: центральное прибрежное звено – как основная база освоения океана; акваториальное звено – в виде стационарной и подвижной инфраструктуры; глубинное материковое территориальное звено. В основе единства АТХК лежит географическая целостность контактных зон «суша – море» и «море – суша».

Портово-промышленный район (ППР) относится к приморской территории, которая характеризуется наиболее сильным притяжением морской деятельности и промышленности с сосредоточением портово-городских агломераций и крупных городов, включая промышленные центры.

Комплексно-управляемые прибрежные зоны (КУПЗ) представляют собой территориальные морехозяйственные структуры с комплексным, междисциплинарным управлением функционированием производства и непроизводственной сферой в прибрежной зоне и обеспечивают ее стратегическое развитие.

Все названные комплексы являются составляющими элементами, МХК прибрежных акваторий СМП, а КУПЗ включает в себя

дополнительно процедуры районирования (схема зонирования) ПЗ и оценку воздействия на ОС.



Рис. 3. Структура морехозяйственного комплекса

Относительно понятия МХК понятие КУПЗ более общее. Поскольку в КУПЗ основными компонентами являются наряду с производством и элементы непроизводственной сферы. В то время как в МХК непроизводственная сфера рассматривается, как одна из составляющих внешней среды. Методология КУПЗ в АЗ РФ сформирована, стратегическое развитие обеспечивается документами государственного и регионального уровня (рис.4) [6].

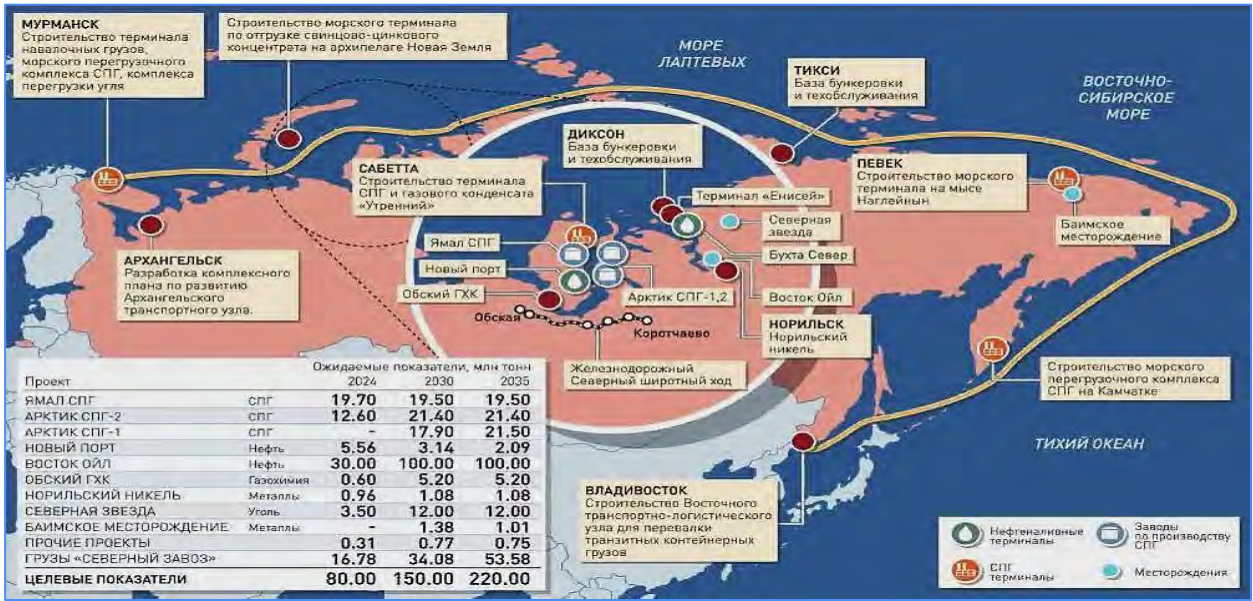


Рис. 4. План развития СМП до 2035 года (Источник Распоряжение правительства РФ)

Говоря о геоэкологическом подходе в управлении состоянием ПЗ акваторий СМП, целесообразно все же использовать термин – МХК по ряду причин:

- МХК прибрежной зоны (ПЗ) акваторий СМП – понятие наиболее общее, включает в себя все приведенные термины, кроме КУПЗ;
- в МХК ПЗ СМП ядрами комплексобразования, как правило, являются крупные ППК, АТХК, ППР плюс береговых транспортно-перегрузочные комплексы (ТПК), а также вспомогательные объекты;
- МХК ПЗ СМП включает и не взаимообусловленные отрасли, расположенные в

береговой зоне, такие как, хозяйства марикультуры, АЭС, санаторно-курортные и туристические комплексы, заповедники и особо охраняемые природные территории.

В общем случае управление МХК представляет собой элемент, функцию организованных систем различной природы (биологических, социальных, технических, экологических) обеспечивающую сохранение их определенной структуры, поддержание режима функционирования, реализацию программы, цели деятельности. В области геоэкологического управления на первый план выступает проблема рационального природопользования, те проблема управления

МХК с учетом его антропогенного воздействия на приморские, береговые и прибрежные территории [7].

Что касается определения цели управления, то, в соответствии, как со стратегией устойчивого развития и стратегией развития АЗ РФ, так и с основными положениями геоэкологического подхода, такой целью является обеспечение долговременного и устойчивого использования ресурсов, обеспечение безопасности ОС на основе комплексного подхода к социально-экономическому развитию региона включая комплексный подход к управлению морским хозяйством.

Выделим главные задачи геоэкологического управления МХК.

1. Снижение уровней загрязнения в процессе освоения и эксплуатации ресурсов Мирового океана, защита океанических, морских и прибрежных экосистем от негативных последствий влияния морехозяйственных производств. Решение данной задачи требует создания научно-методической базы для оценки создания ущерба и восстановления ОС.

2. Рациональное природопользование с учетом геоэкологических (географические и экологические) особенностей территорий, при этом оценка прямого и косвенного влияния МХК на ПЗ должна быть отправной точкой для хозяйственных расчетов и прогнозов развития морехозяйственной деятельности.

3. Комплексное управление морехозяйственной деятельностью. Морехозяйственная деятельность практически невозможно без береговой зоны, где расположены морская инфраструктура, транспортные коммуникации, ориентированные на освоение, добычу, обработку и переработку ресурсов и транспортных грузов. В береговой зоне также расположены вспомогательные предприятия, работающие на привозном сырье, объекты социальной инфраструктуры.

В решении проблемы комплексного управления МХК также важную роль играет методическое обеспечение, основную цель которого можно выразить, как разработку интегрированной концепции геоэкологического управления морехозяйственной деятельностью, экологическими и социально-экономическими процессами в береговой зоне и в общем случае представить, как алгоритм (рис. 5). При разработке такой концепции целый блок задач алгоритма (выделен на рисунке) направлен фактически на получение интегральных количественных: оценок экологического, климатического состояния территорий и акваторий региона и адаптивных ответов экологических систем на совокупное внешнее (антропогенное, техногенное) воздействие на них.

Особенности геоэкологических аспектов прибрежных акваторий СМП изучены достаточно подробно, данные исследования продолжают в соответствии с основными положениями государственной политики в части развития АЗ РФ [1].

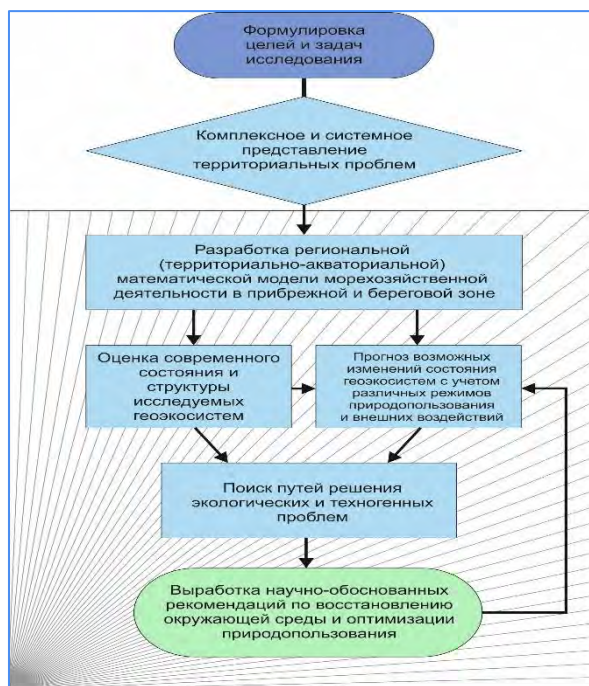


Рис. 5. Алгоритм геоэкологического управления морехозяйственной деятельностью

Развитие подхода комплексного исследования устойчивости эколого-экономических систем требует особого, дополнительного внимания, его реализация внесет весомый вклад в решение задачи геоэкологического управления морехозяйственной деятельностью, приблизит решение проблемы снижения загрязнения прибрежного пространства АЗ РФ, а также решение задачи прогнозирования количественных показателей антропогенного воздействия в целях обеспечения экологической безопасности ОС, населения, региона в целом.

3. Вопросы комплексной оценки экологических показателей морехозяйственной деятельности

В настоящее время экономические и экологические последствия воздействия объектов МХК оцениваются преимущественно сопоставлением экономических результатов функционирования предприятия, которое развивает свою деятельность на стыке территории и акватории, с экологическим ущербом, наносимым ОС.

Примером может послужить оценка воздействия морского порта или другого объекта водного транспорта – речной порт, судоремонтный завод, ремонтно-эксплуатационная база флота и др на ОС путем создания модели взаимодействия его с ОС [8].

Объем деятельности объекта представляется графически как квадрат (рис. 6). Учитывается расход природных ресурсов ($NR_{атм}$, $NR_{лит}$, $NR_{гидр}$) в виде потребления энергетических ресурсов всех сред ОС и воздействия на эти среды отходами хозяйственной деятельности порта.

Объем деятельности определяет размеры грузопотоков – (Q_i), с которыми в порту концентрируются сопутствующие вредности, и определяется экологическая технологичность объекта. Нормы воздействия на ОС устанавливаются с учетом экономической

составляющей, и в большинстве случаев выбросы превосходят предельно допустимые.

Несоответствие экономических и экологических показателей сводится к решению задач использования технических и технологических мер для локализации выбросов, введения организационных и экономических мероприятий для снижения воздействия производственной деятельности объекта ОС. Здесь уже встает вопрос оптимальности природопользования, особенно после введения плат за пользование природными ресурсами.

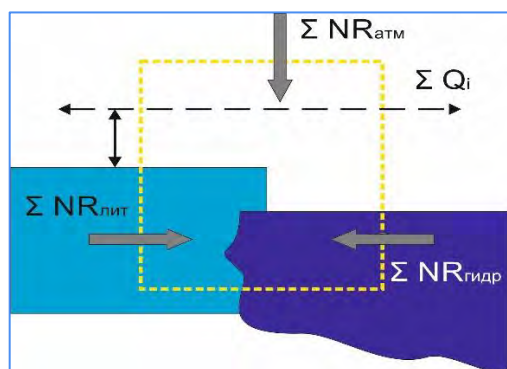


Рис. 6. Модель взаимодействия морского порта и природных ресурсов

В практику природопользования введено понятие «оптимального уровня загрязнения» – (A_0), определяемого «минимальными суммарными издержками» – (E) на «мероприятия по предотвращению загрязнения ОС» – (Π) и «мероприятия по компенсации последствий» – (K) загрязнений в виде штрафов и др. (рис.7).

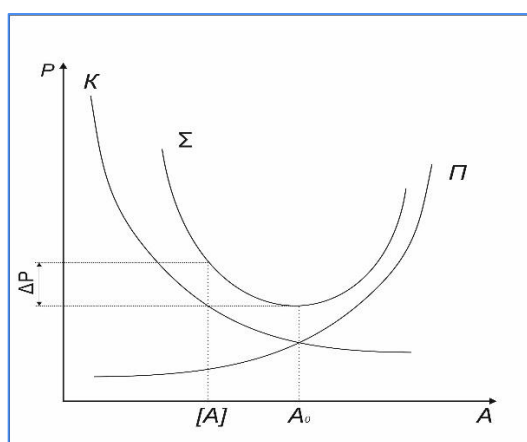


Рис. 7. Схема оптимизации природопользования

Как правило, экономия на технологическом оборудовании будет не оправдана, поскольку высокий уровень загрязнения – (A) определит и более высокую плату – (P) за загрязнение ОС.

Но в реальных условиях часто складывается ситуация, когда проще, эффективнее и дешевле привести уровень загрязнения к некоторой допустимой величине (A). При этом будет соблюдено условие максимального приближения к уровню (A_0), и потребуется увеличение объема капиталовложений – (ΔP) для проведения компенсационных мероприятий («дотационное

природопользование») в целях снижения уровня воздействия морского объекта на ОС.

Кроме того, подобные методики, безусловно, не являющиеся простыми и требующие предварительных вычислений ограничивают разнородность исходных данных и, предназначены для оценки воздействия относительно несложных объектов водного транспорта.

Для применения комплексного подхода в решении геоэкологических задач необходимым условием является использование обширного объема данных, составляющих информацию, характеризующую ОС. В связи с чем необходима организация мониторинга процессов функционирования морехозяйственных отраслей наряду с различными расширенными показателями акватории и береговой зоны для получения исходных данных в соответствии с задачами исследования, создание на основе полученных данных необходимых таблиц, схем, чертежей, карт, диаграмм. Группировка данных в нужном виде, их надлежащее изображение, сопоставление и анализ зависят от квалификации исследователя, выбранного подхода к интерпретации полученной информации, также технической оснащенности, включающей аппаратные средства и программные продукты, использующие технологии геоинформационных систем (ГИС).



Рис. 8. Роль и место ГИС в организации геоэкологического управления

Роль и место ГИС при организации мероприятий геоэкологического управления показаны на схеме (рис. 8), из которой видно, что основой информационного обеспечения ГИС является совокупность данных, поступающих из разных источников. Необходимость решения информационных и аналитических задач приводит к образованию нескольких информационных слоев в системах.

Экологическая система сложна, исследование протекающих в ней процессов требует затрат времени

и средств, при этом получить полную информацию о системе практически невозможно. В этих случаях повсеместно в экологических исследованиях используются средства математического моделирования, сущность которого заключается в формализации поведения систем на основе математических выражений [9]. Моделирование сложных физических процессов возможно с помощью современной вычислительной техники.

Ключевыми категориями выступают показатели, описывающие актуальное экологическое состояние, экологическую емкость области, расположение в координированном пространстве и критерии информационного среза. Информационный срез позволяет управлять «комплексностью» показателя для исследования отдельных областей или временных диапазонов исследования или ограничить пороговыми значениями экологические показатели. Оценка экологического состояния природной среды осуществляется посредством сопоставления экологической емкости с нормированным показателем актуального экологического уровня [10].

Математическая модель (рис. 9) для комплексной оценки экологических показателей представляет собой совокупность нескольких структурных блоков.

Так как одной из проблем комплексной оценки является несоотносимое различие в порядке и единицах измерения состояния каждой отдельно взятой экологической составляющей (литосферы, гидросферы, атмосферы), в связи с этим применяется алгоритм нормализации расчётных отклонений, что позволяет привести значения экологических отклонений к сравнимым величинам.

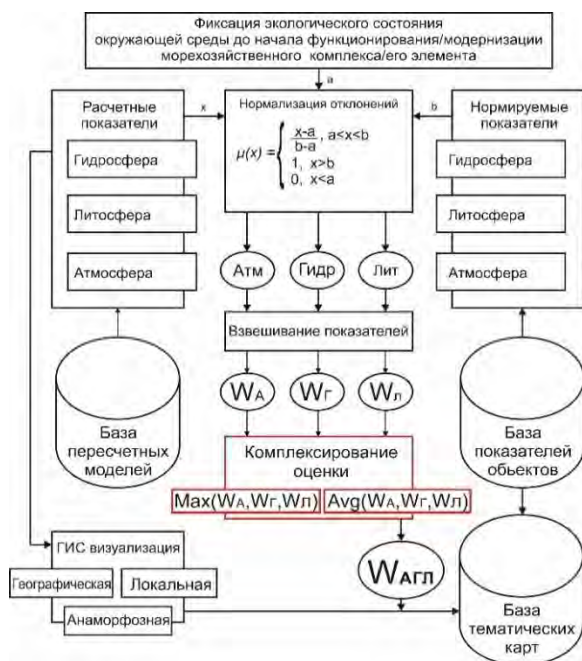


Рис. 9. Модель оценки состояния природной среды

Для проведения нормализации помимо текущего (x) значения загрязнения, необходимы значения границ, показывающие минимальные и максимальные значения экологического состояния природной среды.

В качестве минимального (a) значения предложено использовать значения уровня экологического состояния до начала

функционирования морехозяйственного комплекса или его элемента.

В качестве максимального (b) – значение экологической емкости данного сектора для каждой составляющей компоненты.

После нормализации, каждая компонента проходит взвешивание. Взвешивание осуществляется на основе экспертной оценки значимости и уровня вхождения каждой компоненты в общую экологическую составляющую исследуемой экосистемы с учетом её значимости, хрупкости и потерь потенциальной полезности [11].

Далее осуществляется комплексирование экологической оценки, которая рассчитывается, в зависимости от постановки задачи, либо как максимальная, либо как средневзвешенная по всем показателям.

Отдельно стоит акцентировать внимание на комплексном показателе (рис.10). Один из его способов расчета – методом взвешенного среднего предполагает установку значений дополнительных экспертных весовых значений для описания важности или хрупкости экологического показателя. Сам же комплексный показатель представляет собой совокупность нескольких видов показателей, набор которых варьируется от постановки задачи и выбранных методик расчёта и анализа. Схематично представлена технология оценки экологического состояния ОС в районе влияния техногенеза при функционировании морехозяйственного комплекса, где ($x_1...x_n$) – набор показателей, описывающих актуальное экологическое состояние, ($z_1...z_n$) – набор показателей, описывающих пространственные данные, ($y_1...y_n$) – набор показателей, описывающих экологическую емкость предметной области, ($q_1...q_n$) – набор показателей, описывающих критерии информационного среза.

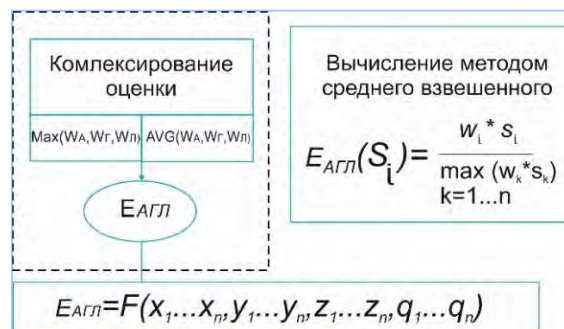


Рис. 10. Комплексный показатель оценки экологического состояния окружающей среды

Важным свойством такой математической модели является двусторонняя адаптивная цикличность, позволяющая корректировать показатель комплексной оценки за счет последовательного изменения входных параметров экологических показателей и в возможности решения обратной задачи – нахождения значений входных параметров для достижения заранее заданного значения оценки.

Предложенная математическая модель при использовании в качестве основы экологического моделирования, позволит учесть не только качественные и количественные параметры экологической среды, но и принять во внимание

временной и пространственный характер загрязнения среды.

Предлагаемый метод для проведения количественной оценки воздействия техногенеза на ОС позволит сделать обоснование для выполнения комплекса мероприятий и рекомендаций по оздоровлению и рекультивации территорий, находящихся в зоне размещения МХК акваторий СМП. Получение интегральных количественных: оценок экологического, климатического состояния территорий и акваторий региона и адаптивных ответов экологических систем на совокупное внешнее (антропогенное, техногенное) воздействие позволит предотвратить прогнозируемое или снизить существующее негативное влияние исследуемых факторов, оптимизировать реализацию природоохранных мероприятий в целом.

Заключение

Наибольшая нагрузка на ПЗ акваторий СМП создается объектами береговых МХК. Задача регулирования, эксплуатации и рационального использования природных ресурсов связана непосредственно с разработкой геоэкологических принципов управления развитием и функционированием МХК акваторий СМП с учетом антропогенного воздействия на приморские, береговые и прибрежные экосистемы.

Геоэкологическое управление МХК региона предполагает обеспечение долговременного и устойчивого использования ресурсов и безопасности ОС на основе комплексного подхода к социально-экономическому развитию региона, что диктует необходимость разработки и использования эффективных моделей оценок экологического состояния объектов ОС, отвечающих целям устойчивого развития АЗ РФ.

В настоящее время последствия воздействия некоторых объектов МХК оцениваются преимущественно сопоставлением экономических и экологических показателей, несоответствие которых сводится к решению задач использования технических и технологических мер для локализации выбросов и проведению компенсационных экономических мероприятий. Кроме того, такие оценки воздействия предназначены для относительно несложных объектов водного транспорта, что не отвечает требованиям геоэкологического управления такими сложными техносферными объектами, как МХК.

В этой связи развитие подхода комплексного исследования устойчивости эколого-экономических

систем требует особого дополнительного внимания, его реализация внесет весомый вклад в решение задачи геоэкологического управления морехозяйственной деятельностью, приблизит решение проблемы снижения загрязнения прибрежного пространства АЗ РФ, и решение задачи прогнозирования количественных показателей антропогенного воздействия в целях обеспечения экологической безопасности ОС и населения, региона в целом.

Применение комплексного подхода в решении геоэкологических задач связано с использованием обширного объема данных, составляющих информацию, характеризующую ОС и техногенные воздействия. Экологическая система сложна, и необходимость решения информационных и аналитических задач приводит к образованию нескольких информационных слоев.

Применение ГИС для группировки данных в нужном виде, их надлежащего изображения, сопоставления и анализа и в конечном итоге для интерпретации полученной информации демонстрирует высокую эффективность в решении экологических задач.

Проблема комплексной оценки, связанная с различием в порядке и единицах измерения параметров каждой отдельно взятой экологической составляющей (литосферы, гидросферы, атмосферы), может быть решена путем применения алгоритма нормализации расчетных отклонений, что позволяет привести значения экологических значений к сравнимым величинам.

Применение средств математического моделирования сложных физических процессов в экологических исследованиях сводится к формализации поведения систем на основе математических выражений. Оценка экологического состояния природной среды осуществляется посредством сопоставления экологической емкости с нормированным показателем актуального экологического уровня.

Получение интегральных количественных оценок геоэкологического состояния экосистем МХК акваторий СМП и адаптивных ответов экологических систем региона на совокупное внешнее воздействие позволит приблизиться к созданию оптимальных моделей экологической безопасности зон транспортного тяготения АЗ РФ, предотвратить прогнозируемое или снизить существующее негативное влияние исследуемых факторов.

Литература

1. Указ Президента РФ от 26.10.2020 г. № 645 / Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года.
2. Распоряжение Правительства РФ от 27.11.2021 г. № 3363-р / Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года.
3. Развитие инфраструктуры морских портов Севморпути – Морские вести России / Транспортная политика [Электронный ресурс] 23.10.2023. – Режим доступа: <https://morvesti.ru/analitika/1692/105605/> дата обращения 01.02.2024
4. Айбулатов Н.А. Деятельность России в прибрежной зоне моря и проблемы экологии / Айбулатов Н.А.; отв. Ред. Осипов В.И.; Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова – М.: Наука, 2005. – 364 с.
5. Основные концепции современного берегопользования: монография. – Т. II. – СПб.: РГГМУ, 2010
6. Дайджест информационно-аналитического центра Государственной комиссии по вопросам развития Арктики [Электронный ресурс] // – Режим доступа: <https://arctic.gov.ru/> дата обращения 02.02.2024
7. Прибрежно-морское природопользование: теория, индикаторы, региональные особенности / под ред.

- П.Я. Бакланова). – Владивосток: Дальнаука, 2010.
8. Назарова Е.П., Степанов А.Л. Контроль экологического состояния акватории порта в современных условиях / Е.П. Назарова, А.Л. Степанов // Седьмой международный экологический форум «День Балтийского моря». – СПб. 2006.
 9. Фурсова П.В., Левич А.П. Математическое моделирование в экологии. // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2002. Т. 8. № 4.
 10. Корчагина Т.В. Метод оценки экологических показателей воздействия на окружающую среду в районах размещения угольных предприятий / Т.В. Корчагина, Ю.А. Степанов, Л.Н. Бурмин. – 2018. № 8. С. 119-126.
 11. Новиков Ю.В. Использование комплексных показателей при разработке гигиенической классификации водоемов по степени их загрязнения / Ю.В. Новиков и др // Гигиена и санитария. – 1994. № 6. – С.11-13.

References

1. Ukaz Prezidenta RF ot 26.10.2020 g. № 645. Strategii razvitiya Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii i obespecheniya natsional'noy bezopasnosti na period do 2035 goda [Strategies for the development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035].
2. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 27.11.2021 g. № 3363-r. Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda [The transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035].
3. Razvitie infrastruktury morskikh portov Sevmorputi [Development of the infrastructure of the seaports of the Northern Sea Route]. Morskie vesti Rossii. Transportnaya politika [Elektronnyy resurs] 23.10.2023. – Rezhim dostupa: <https://morvesti.ru/analitika/1692/105605/> data obrashcheniya 01.02.2024
4. Aybulatov N.A. Deyatel'nost' Rossii v pribrezhnoy zone morya i problemy ekologii [Russia's activities in the coastal zone of the sea and environmental problems]. Aybulatov N.A. otv. Red. Osipov V.I.; In-t okeanologii im. P.P. Shirshova – M.: Nauka, 2005. – 364 s.
5. Osnovnye kontseptsii sovremennogo beregopol'zovaniya: monografiya [The main concepts of modern coastal management]. – T. II. – SPb.: RGGMU, 2010
6. Daydzhest informatsionno-analiticheskogo tsentr Gosudarstvennoy komissii po voprosam razvitiya Arktiki [Digest of the Information and Analytical Center of the State Commission on Arctic Development]. [Elektronnyy resurs] – Rezhim dostupa: <https://arctic.gov.ru/> data obrashcheniya 02.02.2024
7. Pribrezhno-morskoe prirodopol'zovanie: teoriya, indikatory, regional'nye osobennosti [Coastal and marine environmental management: theory, indicators, regional features]. pod red. P.Ya. Baklanova). – Vladivostok: Dal'nauka, 2010.
8. Nazarova E.P., Stepanov A.L. Kontrol' ekologicheskogo sostoyaniya akvatorii porta v sovremennykh usloviyakh [Monitoring of the ecological state of the port's water area in modern conditions]. E.P. Nazarova, A.L. Stepanov. Sed'moy mezhdunarodnyy ekologicheskyy forum «Den' Baltiyskogo morya». – SPb. 2006.
9. Fursova P.V., Levich A.P. Matematicheskoe modelirovanie v ekologii [Mathematical modeling in ecology]. Problemy okruzhayushchey sredy i prirodnkh resursov. – 2002. Т. 8. № 4.
10. Korchagina T.V. Metod otsenki ekologicheskikh pokazateley vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu v rayonakh razmeshcheniya ugol'nykh predpriyatiy [A method for assessing environmental impact indicators in areas where coal enterprises are located]. T.V. Korchagina, Yu.A. Stepanov, L.N. Burmin. – 2018. № 8. S. 119-126.
11. Novikov Yu.V. Ispol'zovanie kompleksnykh pokazateley pri razrabotke gigienicheskoy klassifikatsii vodoemov po stepeni ikh zagryazneniya [The use of complex indicators in the development of hygienic classification of reservoirs according to their degree of pollution]. Yu.V. Novikov i dr. Gigena i sanitariya. – 1994. № 6. – S.11-13.

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

Даргис, Евгений Александрович доцент кафедры безопасности жизнедеятельности, «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: dargis72@mail.ru

Evgeniy A. Dargis, Associate Professor of the Department of Life Safety, Federal State Educational Institution of Higher Education «Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping». 5/7, Dvinskaya str, Saint-Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: dargis72@mail.ru

Кузнецова Елена Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности, «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: helhena@mail.ru

Elena Y. Kuznetsova, Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Life Safety, Federal State Educational Institution of Higher Education «Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping». 5/7, Dvinskaya str, Saint-Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: helhena@mail.ru

Латухов Сергей Васильевич, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности, «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: latukhovsv@gumrf.ru

Sergey V. Latukhov, Dr. Sci. (Geogr), Professor, Head of the Department of Life Safety, Federal State Educational Institution of Higher Education «Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping». 5/7, Dvinskaya str, Saint-Petersburg, 198035, , Russian Federation, e-mail: latukhovsv@gumrf.ru

Поляков Александр Владимирович, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности, «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: elenapol58@mail.ru

Alexander V. Polyakov, Associate Professor of the Department of Life Safety, Federal State Educational Institution of Higher Education «Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping». 5/7, Dvinskaya str, Saint-Petersburg, 198035, , Russian Federation, e-mail: elenapol58@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 04.02.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 11.02.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 22.02.2024.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

COMPUTER MODELING AND DESIGN AUTOMATION

Научная статья

УДК 681.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.028>

Параметрический анализ устойчивости судовых нелинейных систем автоматического управления

Грушун А.И.¹ a.gran69@mail.ru, Грушун Т.А.¹ gai_gta@mail.ru, Осадченко А.Е.¹ aeosadchenko@rambler.ru

¹Севастопольский государственный университет

Аннотация. Рассматривается алгебраический метод построения областей абсолютной устойчивости судовых нелинейных систем автоматического управления (САУ) на основе критерия В.М. Попова и метода D-разбиения. Классическая реализация этих методов требует построения частотного годографа D-разбиения и кривой Попова. Эти годографы имеют нерегулярный характер изменения, и для сложных систем их построение может превратиться в существенную проблему, связанную с выбором шага изменения и максимального значения частоты. В свою очередь, для решения задачи нужны годографы не в целом (не во всем диапазоне частот), а лишь их отдельные точки, с помощью которых определяются границы искомых областей и значения необходимых параметров. Предлагается определять наличие этих точек по положительным вещественным корням специальным образом построенных алгебраических уравнений, что не требует перебора значений частотных характеристик, тем самым не требует их непосредственного построения. Вычисление положительных вещественных корней, в отличие от вычисления комплексных корней, не представляет сложности. Предлагаемое решение задачи позволяет полностью автоматизировать процесс получения результата, повысить сложность исследуемых нелинейных САУ и сократить временные затраты при построении областей абсолютной устойчивости..

Ключевые слова: нелинейная система автоматического управления, абсолютная устойчивость, область устойчивости, положительные вещественные корни

Для цитирования: Грушун А.И., Грушун Т.А., Осадченко А.Е. Параметрический анализ устойчивости судовых нелинейных систем автоматического управления, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 234—240. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.028

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.028>

Parametric analysis of stability of ship nonlinear automatic control systems

Andrey I. Grushun¹ a.gran69@mail.ru, Tatiana A. Grushun¹ gai_gta@mail.ru,

Alexander E. Osadchenko¹ aeosadchenko@rambler.ru

¹Sevastopol state University, Russian Federation

Abstract. We consider an algebraic method for constructing areas of absolute stability of shipboard nonlinear automatic control systems (ACS) based on the criterion of V.M. Popov and the D-partition method. The classical implementation of these methods requires the construction of a frequency hodograph of the D-partition and a Popov curve. These hodographs have an irregular behavior and for difficult systems their construction can turn into a significant problem associated with the choice of the step of change and the maximum frequency value. In turn, to solve the problem, hodographs are needed not as a whole (not in the whole frequency range), but only their individual points, with the help of which the boundaries of the desired areas and the values of the required parameters are determined. It is proposed to determine the presence of these points by positive real roots of specially constructed algebraic equations, that does not require enumeration of the values of the frequency characteristics, thus does not require their direct construction. Calculating positive real roots, unlike calculating complex roots, is not difficult. The proposed solution of the problem makes it possible to fully automate the process of obtaining the result, increase the complexity of the studied nonlinear ACS and reduce time costs when constructing areas of absolute stability.

Keywords: nonlinear automatic control system, absolute stability, stability area, positive real roots:

For citation: Andrey I. Grushun, Tatiana A. Grushun, Alexander E. Osadchenko, Parametric analysis of stability of ship nonlinear automatic control systems, Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 234—240. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.028

Введение

При синтезе судовых САУ различного назначения, когда требуется определить влияние

значений каких-либо варьируемых параметров на устойчивость, строят область (области) устойчивости системы в пространстве этих варьируемых параметров. В дальнейшем, при необходимости,

внутри полученной области строят подобласть с требуемыми (гарантированными) характеристиками.

При построении на ЭВМ областей устойчивости линейных САУ используются как поисковые методы, так и классические [2, 7, 8], но машинно-адаптированные частотные методы D-разбиения. Для коррекции этих областей устойчивости с учетом существенной нелинейности можно применить частотный критерий абсолютной устойчивости В.М. Попова [2, 5, 8].

Будем рассматривать задачу построения на ЭВМ областей абсолютной устойчивости в пространстве одного варьируемого параметра судовых нелинейных систем.

Целью статьи является разработка машинно-ориентированного метода построения областей абсолютной устойчивости судовых нелинейных САУ на основе D-разбиения и критерия В.М. Попова по положительным вещественным решениям алгебраических уравнений, то есть, не требующего построения и анализа частотных характеристик. Таким образом, решение задачи сводится к алгебраизации классических частотных методов теории автоматического управления. Следует отметить, что такой алгебраический подход к решению задач автоматического управления может быть применен для построения областей качества САУ [6], анализа прямых и косвенных показателей качества [3], анализа устойчивости [4, 6], периодических режимов в нелинейных системах.

Предлагаемый в статье алгебраический метод позволяет в бесконечном множестве точек варьируемого параметра установить те, которые определяют границы областей абсолютной устойчивости судовых нелинейных САУ.

Построение областей абсолютной устойчивости судовых нелинейных САУ на основе применения положительных вещественных решений алгебраических уравнений

Современные суда морского и речного флота оснащаются множеством различных по назначению САУ, к наиболее важным из которых относятся САУ движением судна по курсу, также известные как авторулевые. Авторулевое, в общем виде, можно представить структурной схемой, изображенной на рис.1 [1].

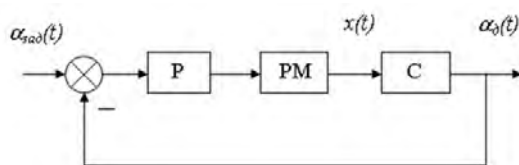


Рис. 1. Общая структурная схема авторулевого

На рис.1 P – регулятор; PM – рулевая машина; C – судно; $\alpha_{зад}(t)$ – заданное значение курса, определяемое положением штурвала; $x(t)$ – задний угол перекладки пера вертикального руля; $\alpha(t)$ – действительное значение курса, вырабатываемое гирокомпасом.

При этом задний угол перекладки пера вертикального руля всегда жестко ограничен в обе стороны от продольной оси корпуса судна. То есть, на выходе рулевой машины возникает типовая

нелинейность с насыщением (усилительное звено с коэффициентом передачи равным единице и ограничением выходного сигнала). Таким образом, исходную САУ (рис. 1), с учетом нелинейности, можно представить структурной схемой, изображенной на рис. 2.

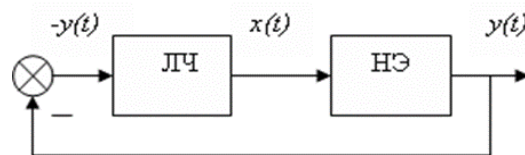


Рис. 2. Структурная схема нелинейной САУ

На рис. 2 НЭ – нелинейный элемент, ЛЧ – линейная часть САУ с передаточной функцией $W_{ЛЧ}(S)$.

Рассматривается случай линейной зависимости от одного варьируемого параметра α числителя и знаменателя передаточной функции $W_{ЛЧ}(S)$. Параметр α , в общем случае, может являться параметром настройки регулятора. Такая передаточная функция имеет вид:

$$W_{ЛЧ}(S) = \frac{c(s) + \alpha v(s)}{a(s) + \alpha b(s)} \quad (1)$$

где $c(s)$, $v(s)$, $a(s)$, $b(s)$ – полиномы с вещественными коэффициентами.

При анализе абсолютной устойчивости по критерию В.М. Попова необходимо, чтобы линейная часть системы была асимптотически устойчивой [5]. Поэтому на первом этапе строим области (интервалы) устойчивости в пространстве параметра α линейной части САУ. Для этого применим метод, описанный в [6].

По передаточной функции (1) запишем характеристический полином:

$$D(s) = a(s) + \alpha b(s). \quad (2)$$

Решение данной задачи удовлетворяет уравнению: $\text{Im}\{-a(j\omega)/b(j\omega)\} = 0$

Подставим в полином (2) вместо S мнимую переменную $j\omega$ и выделим варьируемый параметр:

$$\alpha(j\omega) = -a(j\omega)/b(j\omega). \quad (3)$$

Представим (3) в виде

$$\alpha(j\omega) = \frac{r(\omega)}{z(\omega)} + j \frac{m(\omega)}{z(\omega)}, \quad (4)$$

где $r(\omega)$, $m(\omega)$ и $z(\omega)$ – полиномы с вещественными коэффициентами.

Для выделения интервалов устойчивости и неустойчивости по параметру α вычислим вещественные неотрицательные корни и их кратности полиномов числителя и знаменателя мнимой части (4).

Для определения границ интервалов осуществляем перебор корней полинома числителя $m(\omega)$ и сравниваем очередной корень числителя с корнями полинома знаменателя $z(\omega)$. Исключаем совпадающие корни с учетом их кратности. Оставшиеся после исключения корни полинома $m(\omega)$, которые являются частотами пересечения годографа D-разбиения с вещественной осью, подставляем в действительную часть выражения (4) и определяем границы интервалов «претендентов»

на устойчивость. Упорядочиваем полученные границы варьируемого параметра α по возрастанию, добавляем к ним нижнюю и верхнюю предельные границы (соответствующие $\alpha = -\infty$ и $\alpha = +\infty$) и формируем сами интервалы «претенденты» на устойчивость.

Далее, для каждого интервала определяем устойчивость характеристического полинома $D(s) = a(s) + \alpha_c b(s)$, где α_c – среднее значение интервала, с помощью любого алгебраического критерия устойчивости (например, Рауса). Если полином $D(s)$ устойчив, то и весь интервал изменения параметра является интервалом устойчивости линейной части САУ.

На втором этапе, используя полученные выше интервалы устойчивости линейной части САУ, строим искомые интервалы абсолютной устойчивости замкнутой нелинейной САУ (рис. 2) в пространстве параметра α .

Сначала рассмотрим как алгебраическим методом, основанным на критерии В.М. Попова, определить абсолютную устойчивость САУ при некотором фиксированном значении α из интервала устойчивости, полученного на первом этапе.

Подставив такое α в передаточную функцию (1), можно записать ее в виде

$$W_{\text{ЛЧ}}(S) = \frac{B(S)}{A(S)}, \quad (5)$$

$$\text{где } B(S) = \sum_{i=0}^m b_{m-i} S^i \text{ и } A(S) = \sum_{i=0}^n a_{n-i} S^i.$$

Будем рассматривать только ситуацию, когда линейная часть системы асимптотически устойчива. В этом случае критерий заключается в следующем [2, 5]: для установления устойчивости нелинейной системы достаточно подобрать такое конечное действительное число h , при котором при всех $\omega \geq 0$

$$\operatorname{Re}[(1 + j\omega h)W_{\text{ЛЧ}}(j\omega)] + \frac{1}{k} > 0. \quad (6)$$

Здесь $W_{\text{ЛЧ}}(j\omega)$ – частотная передаточная функция линейной части САУ, а значение k определяется тангенсом угла наклона линии, ограничивающей угол в котором задана нелинейность (рис.3).

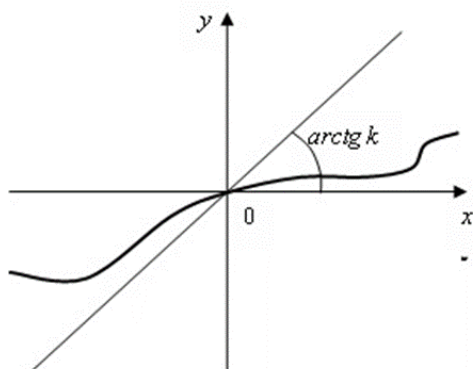


Рис. 3. Сектор расположения нелинейности

Другая формулировка той же теоремы, дающая удобную графическую интерпретацию, связана с

введением модифицированного годографа линейной части [5, 8]

$$W_{\text{ЛЧ}}^*(j\omega) = \operatorname{Re} W_{\text{ЛЧ}}(j\omega) + j\omega \operatorname{Im} W_{\text{ЛЧ}}(j\omega). \quad (7)$$

Эта характеристика получается по годографу линейной части системы путем умножения ее ординат на текущее значение частоты ω .

Обозначив в (7)

$$U^*(\omega) = \operatorname{Re} W_{\text{ЛЧ}}(j\omega), \quad (8)$$

$$V^*(\omega) = \omega \operatorname{Im} W_{\text{ЛЧ}}(j\omega)$$

неравенство (6) можно записать в виде [5]:

$$U^*(\omega) - hV^*(\omega) + \frac{1}{k} > 0. \quad (9)$$

Очевидно, что равенство

$$U^*(\omega) - hV^*(\omega) + \frac{1}{k} = 0 \quad (10)$$

представляет уравнение прямой на плоскости $W_{\text{ЛЧ}}^*(j\omega)$, при построении которой одна точка – точка действительной оси $(-1/k, j0)$, строго фиксирована, а вторая точка – точка мнимой оси $(0, j(1/kh))$, может скользить по ней в диапазоне от $-\infty$ до $+\infty$.

Отсюда вытекает следующая графическая интерпретация теоремы В.М. Попова [2, 5]: для установления устойчивости нелинейной системы достаточно подобрать такую прямую (линию Попова) на плоскости $W_{\text{ЛЧ}}^*(j\omega)$, проходящую через точку $(-1/k, j0)$, чтобы вся кривая $W_{\text{ЛЧ}}^*(j\omega)$ лежала справа от этой прямой, например, как показано на рис.4.

Критерий В.М. Попова является достаточным и его невыполнение еще не означает неустойчивость [2, 5].

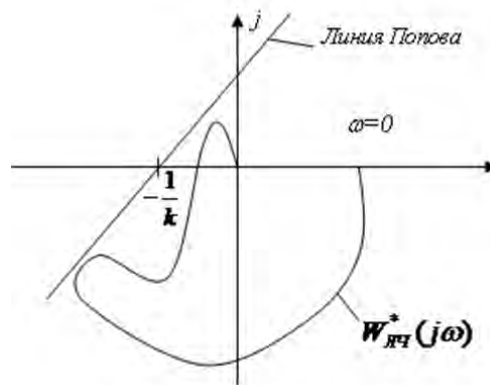


Рис. 4. Графическая реализация критерия В.М. Попова для случая абсолютной устойчивости нелинейной САУ

В дополнение можно отметить, что если годограф $W_{\text{ЛЧ}}^*(j\omega)$ охватывает точку $(-1/k, j0)$ или пересекает действительную ось левее этой точки (рис. 5), то критерий абсолютной устойчивости не выполняется. Если же он не пересекает действительную ось (рис. 6), то критерий выполняется.

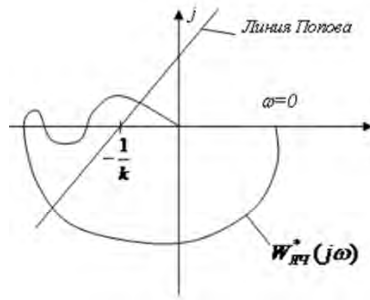


Рис. 5. Графическая реализация критерия В.М. Попова для случая, когда условие абсолютной устойчивости нелинейной САУ не выполняется

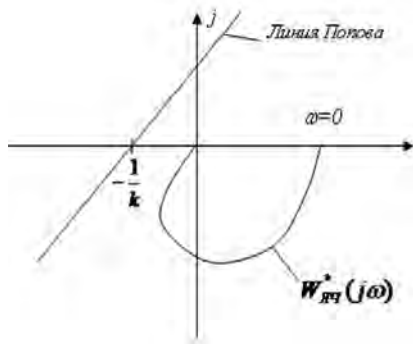


Рис. 6. Графическая реализация критерия В.М. Попова для случая абсолютной устойчивости нелинейной САУ

Таким образом, решение задачи сводится к поиску точек пересечения модифицированного годографа линейной части $W_{ЛЧ}^*(j\omega)$ с линией Попова. При этом, если такие точки отсутствуют то нелинейная САУ абсолютно устойчива.

Наличие таких точек определяется наличием положительных вещественных решений алгебраического уравнения (10), которые являются частотами пересечения или касания годографа $W_{ЛЧ}^*(j\omega)$ с линией Попова. То есть, на основании графической интерпретации критерия Попова многократно, при изменении числа h от $-\infty$ до $+\infty$, решается уравнение (10), что соответствует многократному построению линии Попова при изменении числа $q = 1/kh$ от $-\infty$ до $+\infty$. И в случае, если уравнение (10) при каком либо значении h не имеет положительных вещественных корней, то модифицированный годограф линейной части $W_{ЛЧ}^*(j\omega)$ не пересекается с линией Попова, и нелинейная САУ является абсолютно устойчивой.

Рассматриваем передаточную функцию (5) линейной части САУ.

Заменив в (5) S на $j\omega$, получим

$$W_{ЛЧ}(j\omega) = \frac{B(j\omega)}{A(j\omega)} = \frac{\sum_{i=0}^m b_{m-i}(j\omega)^i}{\sum_{i=0}^n a_{n-i}(j\omega)^i} = \frac{c_1(\omega) + jc_2(\omega)}{z_1(\omega) + jz_2(\omega)}. \quad (11)$$

Тогда, согласно (7), (8) и (11) выражение для построения модифицированного частотного годографа $W_{ЛЧ}^*(j\omega)$ будет иметь вид

$$W_{ЛЧ}^*(j\omega) = U^*(\omega) + jV^*(\omega) = \frac{r(\omega)}{z(\omega)} + j \frac{m(\omega)}{z(\omega)}, \quad (12)$$

где $r(\omega) = c_1(\omega)z_1(\omega) + c_2(\omega)z_2(\omega)$,

$m(\omega) = \omega(c_2(\omega)z_1(\omega) - c_1(\omega)z_2(\omega))$,

$z(\omega) = z_1^2(\omega) + z_2^2(\omega)$ – полиномы с вещественными коэффициентами.

Подставив компоненты выражения (12) в (10) и произведя замену $\beta = 1/k$ получим

$$\frac{r(\omega) - hm(\omega) + \beta z(\omega)}{z(\omega)} = 0. \quad (13)$$

Далее, последовательно перебирая значения числа h от больших по модулю отрицательных до больших положительных значений с шагом Δh , определяем частоты, на которых годограф $W_{ЛЧ}^*(j\omega)$ пересекает соответствующую заданному числу q линию Попова. Очевидно, что, согласно уравнению (13), эти частоты можно найти, не строя амплитудно-фазовую частотную характеристику, а вычислив положительные вещественные корни уравнения

$$r(\omega) - hm(\omega) + \beta z(\omega) = 0 \quad (14)$$

и исключив из них, с учетом кратности, совпадающие с положительными вещественными корнями уравнения $z(\omega) = 0$. И, если такие корни-частоты уравнения (14) отсутствуют или исключаются при соответствующем значении h , то модифицированный годограф линейной части не пересекается с прямой Попова, и исследуемая нелинейная САУ абсолютно устойчива. Следует отметить, что равные корни полиномов числителя и знаменателя уравнения (13) практически не встречаются.

Покажем на примере алгебраическую реализацию критерия Попова при некотором фиксированном значении параметра α . Будем рассматривать нелинейную САУ с передаточной функцией линейной части

$$W_{ЛЧ}(j\omega) = \frac{20}{s^2 + s + 2} \quad (15)$$

и нелинейностью, расположенной в секторе (рис. 3), ограниченном линией с углом наклона в 45° , то есть имеющим значение $k = \tan 45^\circ = 1$.

Заменив в (15) S на $j\omega$ и домножив мнимую часть на ω , получим выражение для построения модифицированного годографа линейной части

$$\begin{aligned} W_{ЛЧ}^*(j\omega) &= U^*(\omega) + jV^*(\omega) = \\ &= \frac{r(\omega)}{z(\omega)} + j \frac{m(\omega)}{z(\omega)} = \\ &= \frac{(-20\omega^2) + 40}{\omega^4 - 3\omega^2 + 4} + j \frac{(-20\omega^2)}{\omega^4 - 3\omega^2 + 4}. \end{aligned}$$

Согласно (13) получаем уравнение

$$\frac{((-20\omega^2) + 40) - h(-20\omega^2) + (\omega^4 - 3\omega^2 + 4)}{\omega^4 - 3\omega^2 + 4} = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{(\omega^4 - 23\omega^2 + 44) - h(-20\omega^2)}{\omega^4 - 3\omega^2 + 4} = 0. \quad (16)$$

Вычислим положительные вещественные корни уравнения (14) для исследуемой системы, то есть корни полинома числителя уравнения (16), при различных значениях числа h : $h=1.0$, $h=0.5$ и $h=0.25$. При первых двух значениях h уравнение (14) таких корней не имеет, то есть пересечения линии Попова с модифицированным годографом линейной части нет, что подтверждается графической реализацией критерия В.М. Попова (рис. 7). В случае, когда значение $h=0.25$ уравнение (14) имеет два положительных вещественных корня $\omega_1 = 1.70799 \text{ с}^{-1}$ и $\omega_2 = 3.88365 \text{ с}^{-1}$, что говорит о пересечении модифицированного годографа линейной части с линией Попова в двух точках (рис. 7) на частотах ω_1 и ω_2 . На основании результатов, полученных классическим методом и предложенным в статье, можно сделать вывод, что они полностью совпадают и исследуемая нелинейная САУ абсолютно устойчива.

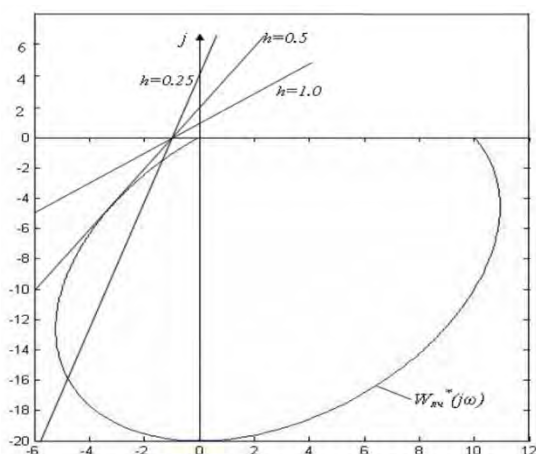


Рис. 7. Пример графической реализации критерия В.М. Попова

Для построения в пространстве варьируемого параметра α областей (интервалов) абсолютной устойчивости замкнутой судовой нелинейной САУ с заданной точностью был разработан алгоритм, основанный на равномерном поиске. Следует отметить, что наличие более одного интервала устойчивости линейной части САУ на практике встречается достаточно редко. Рассмотрим этот алгоритм для одного интервала устойчивости линейной части САУ, полученного на первом этапе.

Шаг 1. Задаем начальное значение варьируемого параметра α_n (α_n — левая граница интервала устойчивости линейной части САУ), конечное значение варьируемого параметра α_p (α_p — правая граница интервала устойчивости линейной части САУ), максимально допустимый шаг изменения варьируемого параметра (максимальный шаг поиска) h_{max} , который определяет минимальную точность

вычисления границ интервалов абсолютной устойчивости.

Обозначим границы искомых интервалов абсолютной устойчивости как G_s^m , где s — номер интервала, а m — номер границы интервала (для левой границы он равен 1, для правой он равен 2).

Шаг 2. Задаем количество точек поиска u .

Шаг 3. Вычисляем шаг изменения варьируемого параметра (шаг поиска) $h_\alpha = (\alpha_p - \alpha_n) / (u - 1)$.

Шаг 4. Выполняем проверку: если $h_\alpha > h_{max}$, то задаем $u = 1.5u$ и переходим к шагу 3, иначе переходим к шагу 5.

Шаг 5. Задаем $\alpha = \alpha_n$. Вычисляем при заданном α значения коэффициентов полиномов числителя и знаменателя передаточной функции (1). Анализируем при этом значении параметра абсолютную устойчивость методом, рассмотренным выше. Если исследуемая нелинейная САУ абсолютно устойчива, то задаем $d_1 = 0$, иначе задаем $d_1 = 1$.

Положим $m = 1, s = 1$.

Выполняем проверку: если $d_1 = 0$, то $G_s^m = \alpha$ и $m = 2$.

Шаг 6. Задаем новое значение $\alpha = \alpha + h_\alpha$.

Выполняем проверку: если $\alpha > \alpha_p + h_\alpha / 2$, процесс определения подынтервалов абсолютной устойчивости нелинейной САУ на данном интервале завершается. При этом, если $d_1 = 0$ и $d_2 = 0$, то $m = 2$ и $G_s^m = \alpha - h_\alpha$.

Шаг 7. Вычисляем при текущем значении α значения коэффициентов полиномов числителя и знаменателя передаточной функции (1). Анализируем абсолютную устойчивость методом, рассмотренным выше. Если исследуемая нелинейная САУ устойчива, то задаем $d_2 = 0$, иначе задаем $d_2 = 1$.

Шаг 8. Выполняем проверку:

- а) если $d_1 = 1$ и $d_2 = 1$, то переходим к шагу 6;
- б) если $d_1 = 0$ и $d_2 = 0$, то переходим к шагу 6;
- в) если $d_1 = 0$ и $d_2 = 1$, то переходим к шагу 9;
- г) если $d_1 = 1$ и $d_2 = 0$, то переходим к шагу 10.

Шаг 9. $G_s^m = \alpha - h_\alpha$. Положим $d_1 = d_2$, $m = 1$, $s = s + 1$ и переходим к шагу 6.

Шаг 10. $G_s^m = \alpha$. Положим $d_1 = d_2$, $m = 2$ и переходим к шагу 6.

Заключение

Предлагаемый в статье алгебраический машинно-ориентированный метод позволяет полностью автоматизировать построение областей абсолютной устойчивости в пространстве параметра

настройки судовой нелинейных САУ. Рассмотренный метод существенно упрощает и улучшает параметрический анализ на ЭВМ устойчивости нелинейных САУ, имеющих высокий порядок или сложную структуру, так как не требует непосредственного построения годографов D-разбиения и линейной части САУ. Он основан на вычислении и анализе положительных

вещественных решений алгебраических уравнений, которые, в отличие от комплексных решений, определяются на ЭВМ численными методами с высокой надежностью и скоростью даже для уравнений высоких (до сорокового) порядков. На базе рассмотренного метода разрабатывается программное обеспечение.

Литература

1. Березин С.Я. Системы автоматического управления движением судна по курсу / С.Я. Березин, Б.А.Тетюев. – Л.: Судостроение, 1990.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1972. – 767 с.
3. Грушун А.И. Машинно-ориентированный метод определения полосы пропускания линейных стационарных систем автоматического управления / А.И. Грушун // Вестник СевГТУ: сб. науч. тр. – Севастополь: изд-во СевГТУ, 1996. – Вып. 2. – С.65 – 68.
4. Грушун А.И. Алгебраический подход к анализу устойчивости систем управления по критерию Найквиста / А.И. Грушун, Т.А. Грушун // Автоматизация процессов и управление: сб.науч. тр. – Севастополь: изд-во СевНТУ, 2003. – Вып. 49. – С.211 – 215.
5. Попов В.М. Об абсолютной устойчивости нелинейных систем автоматического регулирования / В.М. Попов // Автоматика и телемеханика. – М., 1961. – т. 22. – №13.
6. Пряшников Ф.Д. Проблема применения репрезентативных множеств в задачах построения областей устойчивости и качества динамических систем управления / Ф.Д. Пряшников, А.И. Грушун, Т.А. Грушун // Динамические системы. – К.: Лыбидь, 1994. – №13 – С.16 – 20.
7. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования / В.В.Солодовников [и др.]. – М.: Машиностроение, 1967. – Кн.1. – 769 с.
8. Топчиев Ю.М. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования. – М.: Машиностроение, 1989. – 751 с.

References

1. Berezin S.YA. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna po kursu / S.YA. Berezin, B.A.Tetyuev. – L.: Sudostroenie, 1990.
2. Besekerskiy V.A., Popov E.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya. – M.: Nauka, 1972. – 767 s.
3. Grushun A.I. Mashinno-orientirovannyj metod opredeleniya polosy propuskaniya linejnyh stacionarnykh sistem avtomaticheskogo upravleniya / A.I. Grushun // Vestnik SevGTU: sb. nauch. tr. – Sevastopol': izd-vo SevGTU, 1996. – Vyp. 2. – S.65 – 68.
4. Grushun A.I. Algebraicheskij podhod k analizu ustojchivosti sistem upravleniya po kriteriyu Najkvista / A.I. Grushun, T.A. Grushun // Avtomatizaciya processov i upravlenie: sb.nauch. tr. – Sevastopol': izd-vo SevNTU, 2003. – Vyp. 49. – S.211 – 215.
5. Popov V.M. Ob absolyutnoj ustojchivosti nelinejnykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya / V.M. Popov // Avtomatika i telemekhanika. – M., 1961. – t. 22. – №13.
6. Pryashnikov F.D. Problema primeneniya reprezentativnykh mnozhestv v zadachah postroeniya oblastej ustojchivosti i kachestva dinamicheskikh sistem upravleniya / F.D. Pryashnikov, A.I. Grushun, T.A. Grushun // Dinamicheskie sistemy. – K.: Lybid', 1994. – №13 – S.16 – 20.
7. Tekhnicheskaya kibernetika. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya / V.V.Solodovnikov [i dr.]. – M.: Mashinostroenie, 1967. – Kn.1. – 769 s.
8. Topcheev YU.M. Atlas dlya proektirovaniya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 751 s.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Грушун Андрей Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информатика и управление в технических системах, Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: a.gran69@mail.ru

Andrey I. Grushun, Ph. D. (Eng.), Assistant professor, Assistant professor of the Department of informatics and control in technical systems, Sevastopol state University, Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: a.gran69@mail.ru

Грушун Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информатика и управление в технических системах, Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: gai_gta@mail.ru

Tatiana A. Grushun, Ph. D. (Eng.), Assistant professor, Assistant professor of the Department of informatics and control in technical systems, Sevastopol state University, Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: gai_gta@mail.ru

Осадченко Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информатика и управление в технических системах, Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: aeosadchenko@rambler.ru

Alexander E. Osadchenko, Ph. D. (Eng.), Assistant professor of the Department of informatics and control in technical systems, Sevastopol state University, Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: aeosadchenko@rambler.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 30.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 28.01.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 31.01.2024.

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.029>

Навигация автономного подводного аппарата с помощью объединения датчиков методом разнесенного приема при отсутствии угла пеленга

Дементьев К.В.¹ mash.saigon.89@gmail.com, Альчаков В.В.¹ alchakov@gmail.com,
Мирянова В.Н.¹ 1mvn1@mail.ru

¹Севастопольский государственный университет

Аннотация. В данной работе предлагается схема объединения датчиков по методу разнесенного приема для использования расширенного фильтра Калмана в задаче позиционирования подводного аппарата с помощью устройств связи (буев), предоставляющих информацию о местоположении с помощью механизма наклонных дальностей, инерциальных датчиков, доплеровского лага и датчика давления при отсутствии данных об угле пеленга. Описаны методы оценки параметров всех компонентов навигационной системы. Представлены результаты имитационного моделирования с соответствующими метриками качества. Полученные данные позволили сформировать и оценить модель определения положения подводного аппарата, что по-прежнему является актуальной и сложной задачей для исследователей морского дна. Было показано, что объединение датчиков методом разнесенного приема позволяет сократить вектор состояния фильтра, что открывает новые возможности для повышения эффективности и быстродействия систем управления и навигации.

Ключевые слова: подводная навигация, инерциальная навигация, оценка состояния, объединение датчиков, нелинейный фильтр.

Благодарности: авторы выражают благодарность Алексею Александровичу Кабанову за предоставленные средства для проведения экспериментов.

Для цитирования: Дементьев К.В., Альчаков В.В., Мирянова В.Н. Навигация автономного подводного аппарата с помощью объединения датчиков методом разнесенного приема при отсутствии угла пеленга, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 241—250. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.029

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.029>

Autonomous underwater vehicle navigation via sensors maximum-ratio combining in absence of bearing angle data

Kirill V. Dementiev¹ mash.saigon.89@gmail.com, Vasiliy V. Alchakov¹ alchakov@gmail.com,
Vera N. Miryanova¹ 1mvn1@mail.ru

¹Sevastopol state university, Russian Federation

Abstract. The paper proposes a maximum-ratio combining algorithm in the sensor fusion scheme for using an extended Kalman filter in the underwater vehicle positioning task by means of communication devices (buoys) providing location information using a slant-range mechanism, inertial measurement units, a Doppler velocity log, and a pressure sensor in the absence of bearing angle data. The parameter estimation methods for all navigation system components are described. The results of simulation modeling with corresponding quality metrics are presented. The obtained findings allowed to compose and evaluate a position determination model for the underwater vehicle, which is still a relevant and complex task for seabed explorers. It has been shown that the maximal-ratio combining algorithm for sensor fusion provides a reduction in the filter state vector, which opens up new opportunities for improving the efficiency and performance of control and navigation systems.

Key words: underwater navigation, inertial navigation, state estimation, sensors fusion, nonlinear filter. It has been shown that sensor fusion using the maximum ratio technique results in the filter's state vector reduction, which opens up new opportunities for improving the efficiency and performance of control and navigation systems.

Acknowledgments: the authors are grateful to Aleksey Aleksandrovich Kabanov for provided means to conduct the experiments.

For citation: Kirill V. Dementiev, Vasiliy V. Alchakov, Vera N. Miryanova, Autonomous underwater vehicle navigation via sensors maximum-ratio combining in absence of bearing angle, Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 241—250. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.029

Введение

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) – роботы, которые способны перемещаться под водой самостоятельно без вмешательства оператора. До относительно недавнего времени, АНПА использовались лишь в ограниченных областях применения. С развитием технологий обработки данных и высокоэффективных источников

питания, АНПА стали развиваться и использоваться чаще. Как правило, АНПА обладают высокой степенью автономности, гибкости и возможностями удаленной навигации при исследовании морских ресурсов, подводной разведке, сборе данных и других аспектах [1]. С развитием технологий воздушной и наземной навигации, технологии подводной навигации также стали существенно эволюционировать [2,3,4]. Однако, из-за специфики

подводной среды, все еще существует разрыв между точностью навигации и позиционирования подводных аппаратов по сравнению с воздушными и наземными, и на данный момент подводная навигация стала главным камнем преткновения в области морских исследований [5].

Подводя итог, можно сказать, что даже при наличии большего количества датчиков, все еще существует множество ограничений и недостатков в независимой работе АНПА под водой. Однако АНПА способны использовать свои навигационные датчики для получения соответствующей измерительной информации для последующего комплексирования с технологиями подводной акустической связи. Простота и гибкость использования подобных систем привели к повышенному вниманию исследователей к подводному позиционированию АНПА [6,7].

Основной проблемой навигации и позиционирования является оценка состояния, и точный сбор информации о наблюдениях, в особенности для ведущего аппарата в группе. Большинство существующих методов позиционирования АНПА включают улучшенные алгоритмы навигации на основе фильтра Калмана (KF) в сочетании с данными измерений от подводных навигационных датчиков. Модель совместной системы локализации АНПА часто является нелинейной. Поэтому для оценки состояния обычно используется расширенный фильтр Калмана (EKF) [8,9,10].

В настоящее время использование гидроакустических устройств связи для получения относительных наблюдений является наиболее эффективным и надежным методом измерения. Однако АНПА используются в сложных морских средах, где на измерительные датчики могут повлиять неблагоприятные условия, приводя к неизвестным ошибкам измерительной системы. Это неизбежно приводит к снижению точности и стабильности процедуры фильтрации.

Среди существующих решений по задаче позиционирования выделяется работа [11], где рассматривалась система комплексирования информации с датчиков, среди которых данные наклонных дальностей от трех гидроакустических буев, расположенных на поверхности. Аналогичная задача представлена в [12], но задействованы уже четыре буя. В представленных источниках можно выделить существенные недостатки: отсутствие параметров для настройки фильтра и методологии комплексирования информации с датчиков. Более того, не приведены метрики качества по ошибкам работы фильтра, от чего трудно определить степень точности работы алгоритмов восстановления состояния.

Для решения вышеуказанных проблем необходима разработка алгоритма фильтрации при помощи EKF с учетом шумовых параметров датчиков. В настоящей работе будет принято использование двух буев с ультракороткой базой для обеспечения позиционирования подводного аппарата при комплексировании информации с датчиками инерциальной навигации, доплеровским лагом и глубинометром

В качестве схемы расположения гидроакустических приемопередатчиков в основу была взята работа [11], за исключением наличия

только двух буев. В качестве методов математического моделирования динамики объектов навигационной системы (АНПА и буи) были использованы работы [13,14]. Гидродинамические параметры при этом определялись по табличным данным [15,16]. Для представления всех уравнений динамики и кинематики применялась SDC-форма [17]. При моделировании измерений всех датчиков навигационной системы использовались выражения, представленные в работе [18]. Сам расширенный фильтр Калмана для фильтрации состояния формировался по общей методологии, представленной в ряде источников [8,9,10,19].

1. Методы и средства

1.1. Системы навигации подводных аппаратов

В отличие от воздушных или наземных беспилотных летательных аппаратов, АНПА сталкиваются с уникально сложной навигационной проблемой из-за отсутствия высокоточной спутниковой навигации под водой. Разумеется, для дистанционно управляемых транспортных средств информация о дополнительной навигации (положение, скорость) может быть отправлена на транспортное средство по волоконно-оптическому кабелю. Но для беспилотных подводных аппаратов без кабельной связи это практически невозможно реализовать на практике [20].

В литературе существуют три основных метода навигации АНПА: счисление пути и инерциальная навигация, акустическая навигация и методы геофизической навигации [20].

Первый метод основан преимущественно на использовании инерциального навигационного оборудования (например, инерциальной навигационной системы), которая в финансовом отношении стала возможной, особенно после создания технологии микроэлектромеханических систем.

Поскольку погрешности измерений инерциального навигационного оборудования монотонно возрастают и неограничены, другие вспомогательные средства (например, дифференциальная глобальная система позиционирования для положения, журнал скорости доплеровского сдвига или коррелированный журнал скорости для скорости движения на земле; датчики давления для глубины, акустический доплеровский токовый профилировщик для текущей скорости и т.д.) должны быть интегрированы для навигационного средства [19].

Акустическая навигация основана на использовании акустических сигналов транспондера для АНПА для определения его положения. Наиболее распространенными методами являются длинный базовый уровень, который использует, по меньшей мере, два широко разделенных транспондера, установленных обычно на морском дне; и ультракороткая базовая линия, которая использует GPS-откалиброванные транспондеры на сопроводительном поверхностном сосудах. Оба метода имеют ограниченный диапазон (около 10 км для отдельных LBL, в глубокой воде - около 4 км, тогда как менее 0,5 км в мелководье для сетей USBL). Поскольку LBL требует установки маяков, его применимость ограничена миссиями, выполняемыми

в фиксированных положениях (например, защита гавани). Кроме того, установка и обслуживание маяков - сложные и дорогостоящие операции. USBL может не применяться в некоторых военных приложениях из-за тактических ограничений, поскольку для этого требуется сопутствующее поверхностное судно [20].

Как видно на схеме, необходимо объединить измерения различных датчиков, чтобы оценить положение АНПА вместе с ошибками (рис. 1).

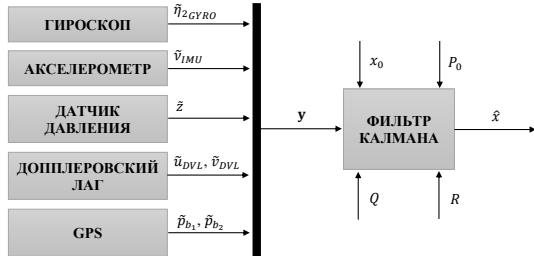


Рис. 1. Схема комплексирования и фильтрации показаний датчиков

Наиболее часто используемый способ получения абсолютной информации о положении под водой - посредством использования буев. Эти буй находятся в известных местах и АНПА получает дальность и/или азимут к нескольким из них, а затем вычисляет свою позицию через трилатерацию или триангуляцию. На основании расположения приемопередатчиков можно выделить три различных базовых системы: система с длинной базой (LBL), система с короткой базой (SBL) и система с ультракороткой базой (USBL) [21].

1.2. Механизм наклонных дальностей

При наличии двух и более буй возможно осуществлять восстановление информации о местоположении объекта-модема при помощи механизма использования наклонных дальностей для перерасчета позиции в мировой системе координат по GPS или ГЛОНАСС.

Рассматривается задача, в которой задействованы два буй. Их расположения при продольном, боковом и вертикальном перемещениях определяются векторами $\eta_1^{(b_1)} = [x_{b_1} \ y_{b_1} \ z_{b_1}]^T$ и $\eta_1^{(b_2)} = [x_{b_2} \ y_{b_2} \ z_{b_2}]^T$. Полагая, что глубина постоянна (без учета волновых возмущений), возможно пренебречь величинами z_{b_1} и z_{b_2} , получив положения на плоскости $p_{b_1} = [x_{b_1} \ y_{b_1}]^T$ и $p_{b_2} = [x_{b_2} \ y_{b_2}]^T$.

Возможность получать наклонные дальности до объекта интереса в виде подводного аппарата позволит рассчитать его положение, но предварительно требуется знание его глубины z (полагаем, что датчик давления работает всегда) для определения проекции дальности на плоскость XY . Обозначая наклонные дальности как r_{b_1} и r_{b_2} получим выражения для их проекций на плоскость

$$\begin{cases} \bar{r}_{b_1} = \sqrt{r_{b_1}^2 - z^2} \\ \bar{r}_{b_2} = \sqrt{r_{b_2}^2 - z^2} \end{cases}$$

В дальнейшем задача определения координат сводится к геометрической задаче поиска точек пересечения двух окружностей центрами которых являются положения буй, а радиусами найденные ранее проекции $\bar{r}_{b_1}$ и $\bar{r}_{b_2}$.

Расстояние между окружностями $d = |p_{b_2} - p_{b_1}|$ позволит воспользоваться теоремой косинусов

$$\cos \alpha = \frac{\bar{r}_{b_1}^2 + d^2 - \bar{r}_{b_2}^2}{2d\bar{r}_{b_1}}.$$

Возможные положения подводного аппарата теперь определяются выражением

$$\begin{bmatrix} x_{SR} \\ y_{SR} \end{bmatrix} = \bar{r}_{b_1} + \bar{U}_d(\bar{r}_{b_1} \cos \alpha) \pm \bar{U}_\perp(\bar{r}_{b_1} \sqrt{1 - \cos^2 \alpha})$$

где $\bar{U}_d = \frac{p_{b_2} - p_{b_1}}{d}$ - единичный вектор от первого до второго центра, $\bar{U}_\perp$ - перпендикуляр к единичному вектору.

Двойственность решения уравнения разрешается, если известно предыдущее значение положения подводного аппарата. В таком случае требуется выбрать точку наиболее близкую к последнему положению аппарата (рис. 2).

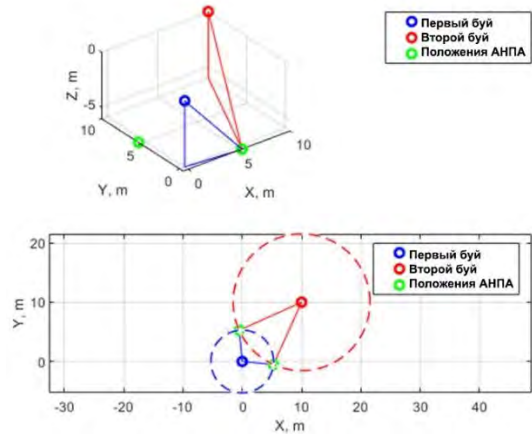


Рис. 2. Геометрия наклонных дальностей

1.3. Описание модели подводного аппарата

Общие координаты автономного подводного транспортного средства определяются в геоцентрической системе координат по SNAME-нотации [13,14]:

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^6, \quad (1)$$

где $\eta_1 = [x \ y \ z]^T$ определяет расположение при продольном, боковом и вертикальном перемещении, соответственно, а вектор $\eta_2 = [\varphi \ \theta \ \psi]^T$ определяет углы Эйлера: крен, тангаж и рыскание, соответственно.

Вектор скоростей v выражается в системе координат, связанной с телом. Скорости по объявленной выше нотации следует записывать как

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T. \quad (2)$$

При наличии гидродинамических эффектов, создаваемых водной средой, возможно записать выражение для динамики подводного аппарата в следующей форме

$$\begin{aligned} M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) &= \tau + J^T(\eta)\bar{f}_e, \\ M &= M_{RB} + M_A, \\ C(v) &= C_{RB}(v) + C_A(v), \end{aligned} \quad (3)$$

где $M_{RB} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – матрица инерции твердого тела (n – число степеней свободы), $M_A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – матрица присоединенных масс, $C_{RB}(v) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – матрица Кориолиса твердого тела, $C_A(v) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – матрица присоединенных масс Кориолиса, $D(v) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – матрица диссипативных сил (сил рассеивания), $g(\eta) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ – вектор гравитационных сил и моментов, $\tau \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ – вектор (сил и моментов) управлений, приложенных телу, $\bar{f}_e \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ – вектор (сил и моментов) внешних возмущений, приложенных телу.

В реальных системах τ рассчитывается с учетом моделей движителей при помощи матрицы распределения движителей (T) как

$$\tau = Tu, \quad (4)$$

где $u \in \mathbb{R}^{p \times 1}$ – вектор, описывающий нагрузку движителей (p – число движителей), а матрица $T \in \mathbb{R}^{n \times p}$ связывает нагрузку движителей u и вектор сил/моментов τ .

Уравнение кинематики, связующее (1) и (2), записывается в форме

$$\dot{\eta} = J^{-1}(\eta)v = \begin{bmatrix} R_I^B(\eta) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_{k,o}(\eta) \end{bmatrix}^{-1} v,$$

где $R_I^B(\eta) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ – матрица поворота, полученная из углов Эйлера, $J_{k,o}(\eta) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ – Якобиан, связующий угловые скорости мировой системы отсчета и системы тела.

Принимая $x = \begin{bmatrix} \eta \\ \dot{\eta} \end{bmatrix}^T$, возможно записать вектор состояния

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{\eta} \\ M^{-1}(Tu + J^T(\eta)\bar{f}_e - C(v)v - D(v)v - g(\eta)) \end{bmatrix}.$$

Последнее уравнение может быть представлено в форме пространства состояний, зависящей от состояния (SDC форма) [17]

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= A(x, t)x + B(x, t)\bar{u}, \quad x(t_0) = x_0, \\ y &= C(t)x + D(t)\bar{u}, \\ A(x, t)x &= \begin{bmatrix} 0_{6 \times 6} & J(x)^{-1} \\ 0_{6 \times 6} & -M^{-1}(C(x) + D(x)) \end{bmatrix}, \quad B(x, t) = \begin{bmatrix} 0_{6 \times 6} \\ M^{-1} \end{bmatrix}, \\ \bar{u} &= Tu + u_{add}(x), u_{add} = J^T(x)\bar{f}_e - g(x), \end{aligned}$$

где $A \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$ – матрица динамики и кинематики, $B \in \mathbb{R}^{2n \times n}$ – матрица управления (матрица входов), $C \in \mathbb{R}^{m \times 2n}$ – матрица выхода (m – число выходов системы), $D \in \mathbb{R}^{m \times n}$ – матрица связи входа и выхода, $\bar{u} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ – вектор управляющих сигналов, включающий в себя вектор внешних возмущений $u_{add} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$.

1.4. Параметры объекта управления

Комплекс поисково-обследовательского АНПА ММТ-300 (рис. 3) предназначен для выполнения обследований дна и водной среды на глубинах до 300 м. Поисковые программы-задания (миссии) можно описать как движение АНПА галсами по обследуемому району с включением бортовых поисковых устройств (одного или нескольких) в заданные моменты времени и затем возвращение аппарата на обеспечивающее судно.

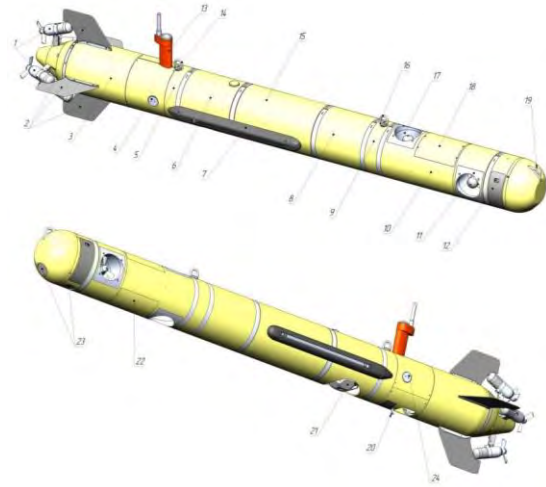


Рис. 3. Составные части автономного необитаемого подводного аппарата ММТ-300:

- 1 – маршевые движители; 2 – стабилизаторы; 3 – кормовой отсек; 4 – герморазъем заряда; 5 – крышка кормовая; 6 – отсек навигации и связи; 7 – антенна ГБО; 8 – отсек полезной нагрузки герметичный; 9 – крышка носовая; 10 – отсек полезной нагрузки забортный; 11 – подруливающее устройство горизонтальное; 12 – крышка отсека; 13 – радиомодуль; 14, 16 – рым грузовой; 15 – отсек автопилота; 17 – подруливающее устройство вертикальное; 18, 22 – крышка отсека полезной нагрузки; 19 – рым буксировочный; 20 – механизм аварийного балласта; 21 – доплеровский лаг; 23 – антенны ЭЛС; 24 – герморазъем связи

Основные геометрические и физические параметры автономного необитаемого подводного аппарата ММТ-300 сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Параметры АНПА					
Масса, m	Длина, L	Радиус, r	Вектор центра масс, r_g^b	Вектор центра плавучести, r_b^b	Плавучесть, B
150 кг	3,081 м	0,147 м	$[0 \ 0 \ 0]^T$ м	$[0 \ 0 \ 0,07]^T$ м	mg , Н

Зная геометрические и физические параметры движителей, возможно определить матрицу распределения движителей (4) по следующему выражению

$$t_i = \begin{bmatrix} f_i \\ r_i \times f_i \end{bmatrix}, T = [t_1 \quad \dots \quad t_n], \quad (5)$$

где f_i – это сила, создаваемая i -м движителем АНПА, r_i – это геометрическое положение точки создаваемой силы i -го движителя относительно центра масс подводного аппарата.

Стоит отметить, что силы, создаваемые движителями ММТ-300, зависят от программного управления, что приводит выражение (5) к параметрической форме

$$t_i(\text{code}) = \begin{bmatrix} f_i(\text{code}) \\ r_i \times f_i(\text{code}) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$T(\text{code}) = [t_1(\text{code}) \quad \dots \quad t_p(\text{code})],$$

где $\text{code} \in [-128; 128]$ – это программный код управления.

По рис. 4 возможно определить значения r_i , которые представлены в таблице 2.

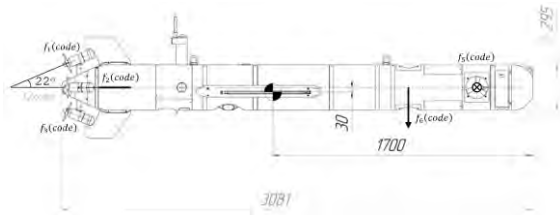


Рис. 4. Геометрия ММТ-300

Таблица 2
Моменты рычагов движителей ММТ-300

N/N	$r_i, (\text{мм})$		
	$l_{x_i}, (\text{мм})$	$l_{y_i}, (\text{мм})$	$l_{z_i}, (\text{мм})$
1.	-1330	0	189
2.	-1330	159	30
3.	-1330	0	-129
4.	-1330	-159	30
5.	1330	0	30
6.	882	0	30

Так как все движители одинаковы по строению, то они создают единую силу, зависящую от программного кода управления $F(\text{code})$. При этом $f_i(\text{code})$ определяются с учетом геометрии объекта управления как

$$f_1(\text{code}) = \begin{bmatrix} F(\text{code}) \cos(22^\circ) \\ 0 \\ F(\text{code}) \sin(22^\circ) \end{bmatrix}, f_2(\text{code}) = \begin{bmatrix} F(\text{code}) \cos(22^\circ) \\ F(\text{code}) \sin(22^\circ) \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$f_3(\text{code}) = \begin{bmatrix} F(\text{code}) \cos(22^\circ) \\ 0 \\ -F(\text{code}) \sin(22^\circ) \end{bmatrix}, f_4(\text{code}) = \begin{bmatrix} F(\text{code}) \cos(22^\circ) \\ -F(\text{code}) \sin(22^\circ) \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$f_5(\text{code}) = \begin{bmatrix} 0 \\ F(\text{code}) \\ 0 \end{bmatrix}, f_6(\text{code}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -F(\text{code}) \end{bmatrix}.$$

По статической характеристике движителей возможно записать функциональную зависимость между кодом управления и создаваемой силой, например при помощи полинома шестого порядка

$$F(\text{code}) = 7.2937 \cdot 10^{-13} \cdot \text{code}^5 - 6.9155 \cdot 10^{-10} \cdot \text{code}^4 - \\ - 2.2935 \cdot 10^{-8} \cdot \text{code}^3 + 2.3559 \cdot 10^{-5} \cdot \text{code}^2 + \\ + 1.9049 \cdot 10^{-4} \cdot \text{code} + 0.1332.$$

Имея определенные выше зависимости, возможно определить $T(\text{code})$ из выражения (6), что позволит определить выражение для сил и моментов (4) уже в форме $\tau(\text{code}) = T(\text{code}) \cdot u$. Причем u здесь определяет процент нагрузки движителей. При полной работоспособности $u = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$.

Динамические параметры твердого тела в матричной форме определялись из источника [14]. Тензор инерции при этом был равен

$$I_{O_b} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}mr^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{12}m(3r^2 + L^2) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{12}m(3r^2 + L^2) \end{bmatrix}.$$

Гидродинамические параметры, учитывая аппроксимацию подводного аппарата симметричной формой, запись матрицы сильно упростится и примет диагональный вид

$$M_A = -\text{diag}\{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} = \\ = \begin{bmatrix} M_A^{Tr} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} & & \\ & \ddots & \\ & & M_A^{Rot} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Единственного верного способа вычисления элементов матрицы M_A нет, поэтому, как правило, используют ряд оценочных методов. Для полнотелого цилиндра массой m , длиной L , радиусом r присоединенные массы (7) определяются как [13]

$$X_u = -0.1m, \\ Y_v = -\pi r^2 L, \\ Z_w = -\pi r^2 L, \\ K_p = 0, \\ M_q = -\frac{1}{12} \pi r^2 L^3, \\ N_r = -\frac{1}{12} \pi r^2 L^3.$$

Сила сопротивления и подъемная сила рассчитываются с помощью

$$F_D = C_D \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) S_D, \quad F_L = C_L \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) S_L,$$

где C_D – коэффициент сопротивления, C_L – коэффициент подъемной силы, ρ – плотность среды, v – скорость тела в жидкости, S_D – площадь поверхности, относительно течения, S_L – площадь поверхности, перпендикулярной течению.

Коэффициенты C_L для цилиндрической аппроксимационной формы АНПА приведены в работе [15]. Для заданной пропорции длины и

радиуса, соответствующий коэффициент равен $C_L = 0,64$.

Коэффициент C_D определяется относительно геометрии носовой части АНПА. В данном случае наиболее близка форма полусферической чаши. В работе [16] приведено соответствующее значение $C_D = 0,4$.

Фронтальная и боковые площади определяются исключительно по базовым геометрическим параметрам подводного аппарата по следующим выражениям:

$$S_D = \pi(0,147)^2 = 0,06789, \\ S_L = 2\pi \cdot 0,147 \cdot 3,081 = 2,8457.$$

Силы, создаваемые при движении цилиндрического тела $F_{DAMP} = [F_D^{OX} \ F_L^{OY} \ F_L^{OZ}]^T$, приблизительно определяются как

$$F_D^{OX} = 0,4 \left(\frac{1000 \cdot u^2}{2} \right) 0,06789 = 13,578u^2, \\ F_L^{OY} = 0,64 \left(\frac{1000 \cdot v^2}{2} \right) 2,8457 = 910,624v^2, \\ F_L^{OZ} = 0,64 \left(\frac{1000 \cdot w^2}{2} \right) 2,8457 = 910,624w^2.$$

Моменты, создаваемые при движении цилиндрического тела, приблизительно определяются как

$$M_{DAMP} = v_1 \times M_A^{Tr} v_1.$$

Силы демпфирования, с учетом рассчитанных параметров определяются следующим образом

$$D(v)v = \text{diag}\{F_{DAMP}, M_{DAMP}\}.$$

1.5. Описание модели фильтра Калмана

Рассмотрим задачу построения фильтра для нелинейной динамической системы, получившего название обобщенного фильтра Калмана. Он позволяет оценивать состояние объекта управления, даже если размерность вектора состояния исследуемой системы превосходит количество измеряемых параметров. Для расчёта текущего состояния априорно известной динамической системы необходимо знать ее текущее измеренное состояние, а также состояние фильтра в момент предыдущего измерения. Задачей фильтра является минимизация суммы квадратов погрешностей оценки вектора состояния [8,9,10].

Запишем систему в SDC-форме с учетом белого шума системы w и белого шума измерений v :

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A(x, t)\hat{x} + B(x, t)\tilde{u} + K_{KF}(t)[y - C(t)\hat{x}], \quad \hat{x}(t_0) = \hat{x}_0, \\ K_{KF}(t) = P(t)C(t)^T R^{-1}, \quad P(t_0) = P_0, \\ \dot{P}(t) = A(x, t)P(t) + P(t)A(x, t)^T + GQG^T - P(t)C(t)^T R^{-1}C(t)P(t),$$

где $P(t)$ – это оценка ковариации состояния, P_0 – начальное значение оценки ковариации состояния, $K_{KF}(t)$ – это матрица усиления фильтра Калмана, Q и R представляют собой матрицы штрафов уравнения Риккати.

Шумы w и v при этом должны удовлетворять условиям: $E(w) = E(v) = 0$, $E(w w^T) = Q$, $E(v v^T) = R$.

1.6. Модель объединения датчиков

Согласно рис. 1 требуется осуществлять комплексирование информации с датчиков при формировании вектора измерений для последующей фильтрации. Существует множество методов объединения показаний датчиков.

В сфере телекоммуникаций объединение с максимальным отношением (MRC) или метод разнесенного приема – это метод объединения данных, при котором: сигналы каждого канала суммируются, коэффициент усиления каждого канала устанавливается пропорциональным среднеквадратичному уровню сигнала и обратно пропорциональным среднеквадратичному уровню шума в этом канале

$$S_{opt} = \frac{\sigma_y^2 x + \sigma_x^2 y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}.$$

Объединение с максимальным отношением является оптимальным средством комбинирования для независимых каналов с аддитивным белым гауссовским шумом. Если гидроакустические буи однозначно определяют положение, то данные доплеровского лага с ИНС в векторе измерений необходимо объединять:

$$\tilde{u} = \frac{\sigma_{DVL}^2 \tilde{u}_{IMU} + \sigma_{IMU}^2 \tilde{u}_{DVL}}{\sigma_{IMU}^2 + \sigma_{DVL}^2}, \quad \tilde{v} = \frac{\sigma_{DVL}^2 \tilde{v}_{IMU} + \sigma_{IMU}^2 \tilde{v}_{DVL}}{\sigma_{IMU}^2 + \sigma_{DVL}^2},$$

где σ_{DVL}^2 – СКО ошибки по скорости, σ_{IMU}^2 – СКО ошибки акселерометра.

2. Результаты моделирования

2.1. Параметры компонентов системы

При программной имитации процесса фильтрации рассматривается следующая ситуация: аппарат ММТ-300 совершает движение к заданной точке, на поверхности воды при этом располагаются два гидроакустических буя. Влияние поверхностного течения учитывается, влияя на смещение буюв. Если ошибка измерения больше оценки неопределенности состояния, то фильтр будет больше “доверять” данным моделирования. Именно поэтому важно правильно подобрать значения ковариационных матриц – основного инструмента настройки фильтра. При заданных параметрах шумов измерительных устройств, параметры EKF представлены ниже:

$$P_0 = I_{12 \times 12}, Q = 0, \\ \hat{x}_0 = x_0 + w_{x_0} \sim \mathcal{N}(0, 0,05), \\ R = \text{diag}\{0,8; 0,8; 0,102; 0,15; 0,15; 0,15; \dots \\ \dots 0,25; 0,25; 0,35; 0,14; 0,14; 0,14\}.$$

Предполагается, что при комплексировании информации датчиков используется доплеровский лаг в силу небольшого отстояния от морского дна. Также, стоит отметить, что для моделирования дискретного характера измерительных устройств используются экстраполяторы нулевого порядка с

частотами обновления, представленными в таблице ниже.

Таблица 3
Частоты обновления данных с датчиков

N/N	Датчик	Частота обновления
1.	ИНС	50 Гц
2.	GPS	1 Гц
3.	Допплеровский лаг	25 Гц
4.	Глубинометр	50 Гц

Структурная схема модели системы представлена на рис. 5 и отражает основные ее составляющие: гидроакустические буи для получения наклонных дальностей до АНПА, контроллер для посылы управляющих сигналов, блок динамики/кинематики подводного аппарата и блок комплексирования сигналов с датчиков.

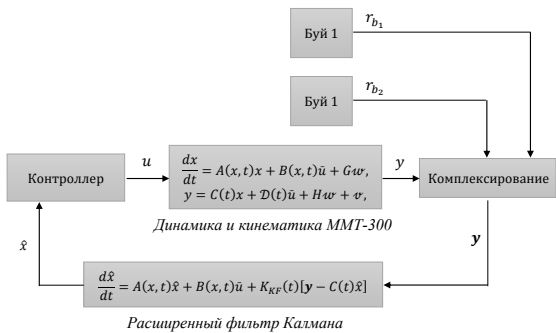


Рис. 5. Структурная схема системы

2.2. Графики выходов системы

Результаты моделирования представлены ниже. Начальное состояние подводного аппарата при этом определяются нулевыми. На рис. 6 отображены траектории подводного аппарата и гидроакустических буйев.

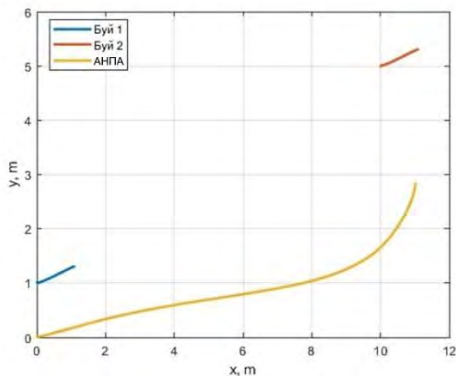


Рис. 6. XY положение буйев и АНПА

Графики выхода системы приведены на рис. 7. Здесь очевидны погрешности измерительных датчиков: заметны шумы и высокие частоты обновления. Результаты работы фильтра Калмана для восстановления состояния приедены на рис. 8 и показывают более приемлемые результаты относительно действительных данных.

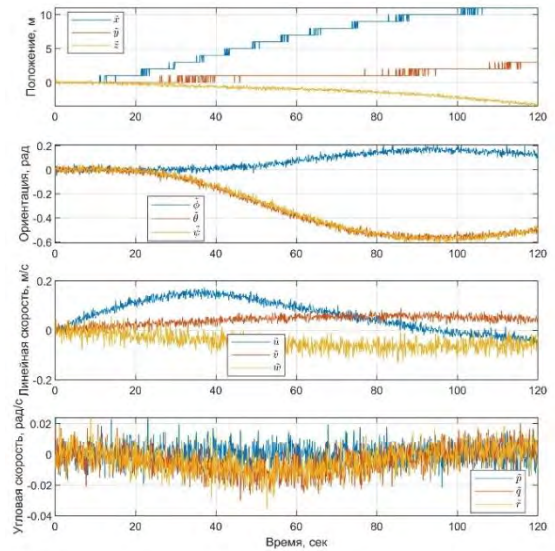


Рис. 7. Графики измерений

Более корректную оценку работы фильтра возможно произвести по ошибке относительно действительных данных (рис. 9). Количественная оценка уже определяется метриками качества. MSE, MAE и RMSE метрики сведены в таблицу 4.

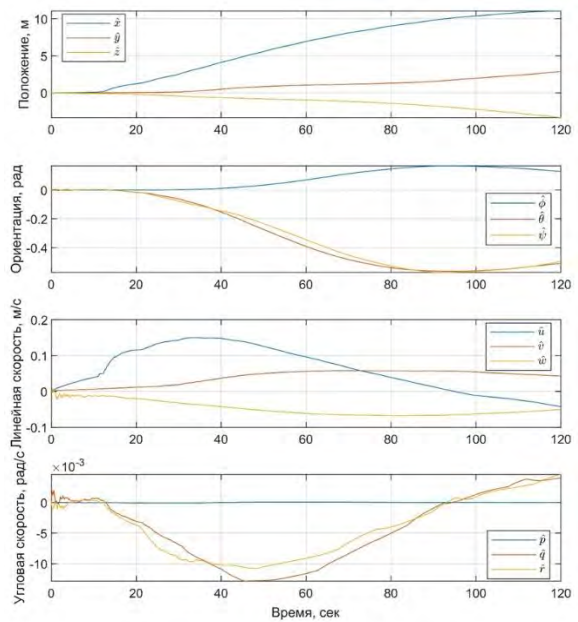


Рис. 8. Графики оценок

Таблица 4

Метрики качества

Метрика	Величина
MSE (η)	[1,868 3,292 0,391 0,030 0,044 0,318] ^T
MSE (ν)	[0,192 0,115 0,063 0,002 0,043 0,014] ^T
MAE (η)	[0,030 0,082 0,008 0,001 0,002 0,005] ^T
MAE (ν)	[0,003 0,002 0,005 0,000 0,000 0,001] ^T
RMSE (η)	[0,075 0,117 0,140 0,001 0,004 0,017] ^T
RMSE (ν)	[0,007 0,004 0,002 0,000 0,000 0,001] ^T

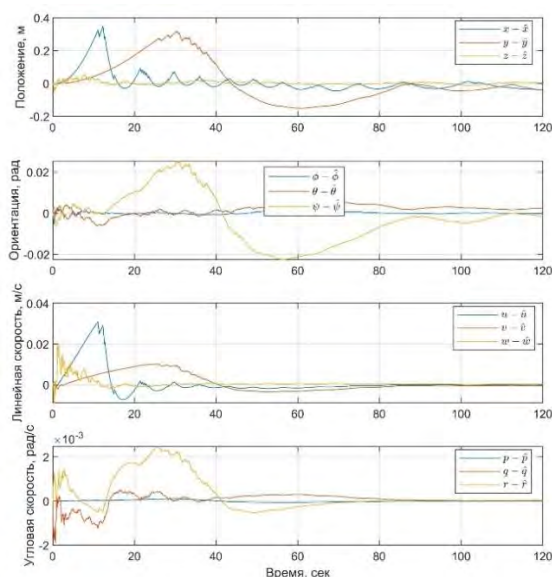


Рис. 9. Графики ошибок

Заключение

Основная цель настоящего исследования заключалась в разработке подходов и решений, позволяющих обеспечить качественную навигацию в автономном режиме с использованием ИНС датчиков грубого класса точности. В ходе выполнения исследования была разработана имитационная модель движения подводного робота. Все предложенные алгоритмы и подходы были протестированы с помощью средств имитационного моделирования и с использованием натурных данных.

Поставленная цель была достигнута: показана практическая возможность достижения приемлемого качества навигации в автономном режиме с использованием ИНС грубого класса точности. Ошибка позиционирования оказывается ограниченной на длительном временном интервале даже при условии начала движения из большой области начальной неопределенности.

Литература

1. Miller A., Miller B., Miller G. Navigation of Underwater Drones and Integration of Acoustic Sensing with Onboard Inertial Navigation System // Drones. 2021. Т. 5. № 3. С. 83
2. Li J. и др. Research on Error Correction Technology in Underwater SINS/DVL Integrated Positioning and Navigation // Sensors. 2023. Т. 23. № 10. С. 4700.
3. Otero P. и др. Underwater Positioning System Based on Drifting Buoys and Acoustic Modems // JMSE. 2023. Т. 11. № 4. С. 682.
4. Li P. и др. A Robust INS/USBL/DVL Integrated Navigation Algorithm Using Graph Optimization // Sensors. 2023. Т. 23. № 2. С. 916.
5. González-García J. и др. Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions // Applied Sciences. 2020. Т. 10. № 4. С. 1256.
6. Kebkal K. G., Mashoshin A. I. AUV acoustic positioning methods // Gyroscopy Navig. 2017. Т. 8. № 1. С. 80–89.
7. Pacini F. и др. Integrated communication network for underwater applications: the SWARMS approach // 2018 Fourth Underwater Communications and Networking Conference (UComms). Lercici: IEEE, 2018. С. 1–5.
8. Zhao L. и др. An Adaptive Filtering Method for Cooperative Localization in Leader–Follower AUVs // Sensors. 2022. Т. 22. № 13. С. 5016.
9. Zhang F., Wu X., Ma P. Consistent Extended Kalman Filter-Based Cooperative Localization of Multiple Autonomous Underwater Vehicles // Sensors. 2022. Т. 22. № 12. С. 4563.
10. Sheng G. и др. Cooperative Navigation Algorithm of Extended Kalman Filter Based on Combined Observation for AUVs // Remote Sensing. 2023. Т. 15. № 2. С. 533.
11. Almeida J. и др. Underwater Localization System Combining iUSBL with Dynamic SBL in iVAMOS! Trials // Sensors. 2020. Т. 20. № 17. С. 4710.
12. Huang J. An Underwater Target Tracking Algorithm Based on Extended Kalman Filter // Mobile Information Systems. 2023. Т. 2023. С. 1–12.
13. Antonelli G. Underwater Robots. Cham: Springer International Publishing, 2014.
14. Fossen T. I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. Hoboken, NJ Chichester, West Sussex: Wiley, 2021. Вып. Second edition. 710 с.
15. Blevins R. D. Applied fluid dynamics handbook. Malabar, Fla: Krieger Pub, 2003. Вып. Reprint ed. with corrections. 558 с.
16. Experimental Investigation of the Robinson-Type Cup Anemometer // NTRS - NASA Technical Reports Server : [сайт]. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930091586> (дата обращения: 01.11.2023).
17. Kabanov A. и др. Cooperative Control of Underwater Vehicle–Manipulator Systems Based on the SDC Method // Sensors. 2022. Т. 22. № 13. С. 5038.
18. Shaukat N. и др. Multi-Sensor Fusion for Underwater Vehicle Localization by Augmentation of RBF Neural Network and Error-State Kalman Filter // Sensors. 2021. Т. 21. № 4. С. 1149.
19. Luo Q. и др. A SINS/DVL/USBL Integrated Navigation and Positioning IoT System with Multiple Sources Fusion and Federated Kalman Filter. : In Review, 2021.
20. Kabanov A., Kramar V. Marine Internet of Things Platforms for Interoperability of Marine Robotic Agents: An Overview of Concepts and Architectures // JMSE. 2022. Т. 10. № 9. С. 1279.
21. Kebkal K. G. и др. Experimental Performance of a Hydro-Acoustic USBL-Aided LBL Positioning and Communication System // IFAC Proceedings Volumes. 2012. Т. 45. № 5. С. 249–254.

References

1. Miller A., Miller B., Miller G. Navigation of Underwater Drones and Integration of Acoustic Sensing with Onboard Inertial Navigation System. *Drones*. 2021. Vol. 5. № 3. P. 83
2. Li J. et al. Research on Error Correction Technology in Underwater SINS/DVL Integrated Positioning and Navigation. *Sensors*. 2023. Vol. 23. № 10. P. 4700.
3. Otero P. et al. Underwater Positioning System Based on Drifting Buoys and Acoustic Modems. *JMSE*. 2023. Vol. 11. № 4. P. 682.
4. Li P. et al. A Robust INS/USBL/DVL Integrated Navigation Algorithm Using Graph Optimization. *Sensors*. 2023. Vol. 23. № 2. P. 916.
5. González-García J. et al. Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. № 4. P. 1256.
6. Kebkal K. G., Mashoshin A. I. AUV acoustic positioning methods. *Gyroscopy Navig.* 2017. Vol. 8. № 1. P. 80–89.
7. Pacini F. et al. Integrated communication network for underwater applications: the SWARMS approach. 2018 Fourth Underwater Communications and Networking Conference (UComms). Lercici: IEEE, 2018. P. 1–5.
8. Zhao L. et al. An Adaptive Filtering Method for Cooperative Localization in Leader–Follower AUVs. *Sensors*. 2022. Vol. 22. № 13. P. 5016.
9. Zhang F., Wu X., Ma P. Consistent Extended Kalman Filter-Based Cooperative Localization of Multiple Autonomous Underwater Vehicles. *Sensors*. 2022. Vol. 22. № 12. P. 4563.
10. Sheng G. et al. Cooperative Navigation Algorithm of Extended Kalman Filter Based on Combined Observation for AUVs. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. № 2. P. 533.
11. Almeida J. et al. Underwater Localization System Combining iUSBL with Dynamic SBL in iVAMOS! Trials. *Sensors*. 2020. Vol. 20. № 17. P. 4710.
12. Huang J. An Underwater Target Tracking Algorithm Based on Extended Kalman Filter. *Mobile Information Systems*. 2023. Vol. 2023. P. 1–12.
13. Antonelli G. *Underwater Robots*. Cham: Springer International Publishing, 2014.
14. Fossen T. I. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. Hoboken, NJ Chichester, West Sussex: Wiley, 2021. Rel. Second edition. 710 p.
15. Blevins R. D. *Applied fluid dynamics handbook*. Malabar, Fla: Krieger Pub, 2003. Rel. Reprint ed. with corrections. 558 c.
16. Experimental Investigation of the Robinson-Type Cup Anemometer. NTRS - NASA Technical Reports Server : [website]. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930091586> (access date: 01.11.2023).
17. Kabanov A. et al. Cooperative Control of Underwater Vehicle–Manipulator Systems Based on the SDC Method. *Sensors*. 2022. Vol. 22. № 13. P. 5038.
18. Shaukat N. et al. Multi-Sensor Fusion for Underwater Vehicle Localization by Augmentation of RBF Neural Network and Error-State Kalman Filter. *Sensors*. 2021. Vol. 21. № 4. P. 1149.
19. Luo Q. et al. A SINS/DVL/USBL Integrated Navigation and Positioning IoT System with Multiple Sources Fusion and Federated Kalman Filter. : In Review, 2021.
20. Kabanov A., Kramar V. Marine Internet of Things Platforms for Interoperability of Marine Robotic Agents: An Overview of Concepts and Architectures. *JMSE*. 2022. Vol. 10. № 9. P. 1279.
21. Kebkal K. G. et al. Experimental Performance of a Hydro-Acoustic USBL-Aided LBL Positioning and Communication System. *IFAC Proceedings Volumes*. 2012. Vol. 45. № 5. P. 249–254.

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, ассистент кафедры «Информатика и управление в технических системах», Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: mash.saigon.89@gmail.com

Kirill V. Dementiev, postgraduate student, assistant of the Informatics and Control in Technical Systems Department, Sevastopol state university, Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: mash.saigon.89@gmail.com

Альчаков Василий Викторович, к.т.н., доцент кафедры «Информатика и управление в технических системах», Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: alchakov@gmail.com

Vasiliy V. Alchakov, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Informatics and Control in Technical Systems Department, Sevastopol state university, Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: alchakov@gmail.com

Мирянова Вера Николаевна, к.т.н., доцент кафедры «Информатика и управление в технических системах», Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: 1mvn1@mail.ru

Vera N. Miryanova, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Informatics and Control in Technical Systems Department, Sevastopol state university, Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: 1mvn1@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 04.12.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 29.01.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 30.01.2024.

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.030>**К вопросу о применении существующих конструкций автоматизированных швартовых устройств в автономном судовождении**Заслонов В.В.¹ djdf3d@yandex.ru¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, г. Новороссийск, Российская Федерация

Аннотация. В настоящей статье рассматривается проблема внедрения автоматизированных швартовых устройств в рамках опытно-конструкторской работы «Разработка системы управления и проектирование буксира-автомата» для обеспечения морских операций в связке с грузовым судном без участия человека. Были рассмотрены варианты конструкции разных разработчиков, которые были воспроизведены в системе объемного моделирования без магнитных и вакуумных устройств стыковки, так как в процессе отдельного эксперимента было проведено математическое сравнение в автоматической системе расчета рассматриваемых устройств и произведены имитации по распределению нагрузки, тепла и др., для того чтобы установить, что тип стыковки при морских операциях не влияет на вид конструкции швартового устройства. Воспроизведенные конструкции, внедренные в эксплуатацию, были так же подвергнуты спектральным экспериментам, в ходе которых было выявлено, что существующие конструкции невозможно применять на борту судна для осуществления эскорта, раскантовки и швартовых операций по причине отсутствия необходимых технических и технологических возможностей, что отражается на безопасности. В свою очередь, была предложена и описана конструкция, удовлетворяющая критериям надежности, что установлено в ходе имитационных экспериментов при моделировании.

Ключевые слова: Морские автономные надводные суда, швартовное устройство, автоматизация, автономное судовождение, автоматическое швартовное средство, вакуумная подушка, электромагнит.

Для цитирования: Заслонов В. В. К вопросу о применении существующих конструкций автоматизированных швартовых устройств в автономном судовождении. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 part 1, P. 251—258. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.030

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.030>**To the question of using existing design automated mooring devices in autonomous navigation**Vladimir V. Zaslouov¹ djdf3d@yandex.ru,¹Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossisk, Russian Federation

Abstract. This article discusses the problem of the introduction of automated mooring devices in the framework of the experimental design work "Development of a control system and design of an automatic tug" to ensure maritime operations in conjunction with a cargo vessel without human participation. Design variants from well-known developers were considered, which were reproduced in a volumetric modeling system for visualizing processes and obtaining experimental data, and an automatic calculation system was developed to obtain statistical data during modeling. The essence of the experiment was to reproduce the loads in the models that would arise in cases of their use when unboarding, escorting, mooring a cargo ship by the developed automatic tugs. As a result of the experiment, the variants of the application of the most well-known methods of docking - vacuum and magnetic - were evaluated, the application of these methods in the process of sea maneuvers in the conditions of the introduction of marine autonomous surface vessels was evaluated. The conclusion of this article is the justified criteria for the design of a new automated mooring device, which formed the basis for the design of a mooring device, a variant of which is also proposed in this paper.

Key words: Marine autonomous surface vessels, automatic tugboat, mooring device, automation, autonomous navigation, automatic mooring means, vacuum cushion, electromagnet

For citation: Vladimir V. Zaslouov. To the question of using existing design automated mooring devices in autonomous navigation, Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 251—258. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.030

Введение

Электромагнитные и вакуумные швартовые устройства разрабатывались с 70-х годов XX века как в СССР, так и за рубежом. Сегодня они представлены во множестве технических вариаций. Современные порты используют узлы (системы) для обеспечения оптимизации процессов швартовки, такие как:

- Оптические и лазерные приборы;

- Специальные гаки;
- Лебедки и иные устройства добора швартовых концов.

Эрик Фиктори, Мартин Вервей (Дельфтский технический университет) разработали электромагнит, поле которого проникает в корпус судна на незначительную глубину. На базе данной технологии в порту Роттердама испытывают разработанное причальное магнитное устройство. Конкуренты голландских разработчиков из

новозеландской компании «Mooring System», которые разработали систему вакуумной швартовки судов, утверждают, что электромагниты являются значительными потребителями и не способны функционировать без постоянной подачи электроэнергии. Инженеры из Дельфтского технического университета утверждают, что принятые меры позволят обезопасить суда в порту на случай любых перебоев, а также электромагниты на порядок компактнее вакуумных присосок, что является для современных портов значительным преимуществом в виду плотности размещения портовой береговой инфраструктуры.

Разработчики, которые достигли значительных успехов во внедрении автоматических швартовых устройств (далее – АШУ) – «Mampaey Offshore Industries» (автоматические электромагнитные швартовые устройства – далее – ЭМШУ) и «Cavotec» (автоматическое вакуумное швартовное устройство – далее ВШУ), утверждают, что подобные технологии оптимизируют процесс швартовки, достигая высокой скорости швартовых операций, а также делая ее более безопасной.

Необходимо отметить, что подобные устройства не получили широкого распространения непосредственно для использования на борту судна. Данная технология применима на судах для швартовки с причалом, заменяя стационарные установки на причале или для подхода лагом к судну с целью бункеровки.

В рамках «Стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года» [1, 11] принимаются меры по внедрению безэкипажных систем, к числу которых относится разработка и постройка буксира-автомата исходя из

открытого источника по проводимому тендеру ОКР «Разработка системы управления и проектирование буксира-автомата».

Буксир должен осуществлять в автономном и дистанционных режимах [4]:

- Эскортирование;
- Швартовые операции;
- Раскантовка.

Исходя из специфики безэкипажного судовождения [3, 12], данная концепция подразумевает выполнение операций без участия человека [9]. Для безопасного и эффективного выполнения морских маневров необходимы соответствующие приспособления, заменяющие классические канаты, гаки и др. Оптимальный вариант – адаптация существующих технологий автоматических швартовок – электромагнитные и вакуумные. Указанные аспекты и исследуются в настоящей работе [2].

Сравнительный анализ автоматических швартовых устройств на базе разных узлов сцепки

Узлами стыковки вакуумных и электромагнитных швартовых устройств являются вакуумная подушка и группа электромагнитов соответственно. Для оценки существующих устройств для выполнения маневров в условии внедрения морских автономных надводных судов (далее – МАНС) проведем моделирование обозначенных узлов для имитации возникающих усилий для выполнения швартовых операций, эскортирования, раскантовки (см. рисунок 1, 2).

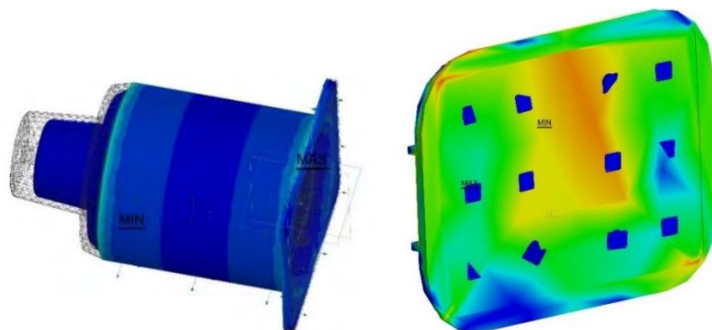


Рис. 1. Имитация поведения при физической нагрузке электромагнита (слева) и размещенных электромагнитов в пластине швартовой конструкции справа

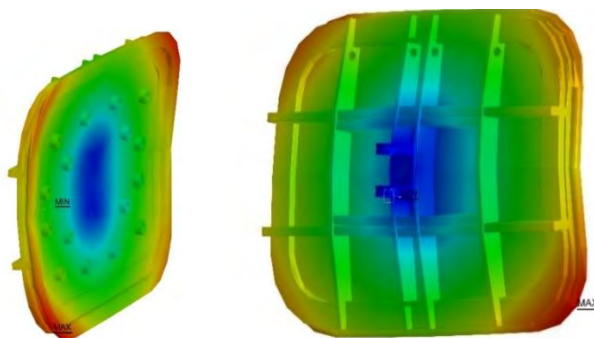


Рис. 2. Имитация нагрузки, возникающей в вакуумной подушке

В процессе виртуального эксперимента было установлено, что оценка конструктивной целостности электромагнита в отдельности не имеет смысла, так

как находясь в пластине швартового устройства, данная группа узлов не подвергается нагрузкам, которые были воссозданы в отдельности, а

напряжение испытывает основная конструкция швартовного устройства, в частности, пластина, которая является ее частью и выступает муфтой при передаче нагрузок.

Была разработана автоматическая система расчета ряда факторов при моделировании. Было установлено, что общая прижимная площадь вакуумной подушки при имитации единой удерживающей силы окажется больше, хотя при ряде фактов электромагнитный швартовый узел окажется массивней из-за сердечника, обмотки (см. рисунок 2). При этом надо отметить, что достигнуть единого усилия возможно в обоих вариантах, но

отличие будет в одном случае в габаритах, а в другом - в весе.

Таким образом, сформулируем сравнительные критерии швартовного устройства с применением электромагнита и вакуумной подушки (см. таблица 1) на основании которых можно утверждать, что любой из этих узлов, способный обеспечить необходимую удерживающую силу при описанных ранее маневрах подходит для обеспечения швартовных операций в автономной режиме. При наличии взаимных положительных и отрицательных факторов у обоих узлов необходимо осуществлять выбор с учетом условий эксплуатации и наличия таких условий, как источник питания, швартуемые суда и др [5, 6].

(3)	1. Уравнение силы тяги (кН)	
	$P_1 = 212.76 * 10^5 * B_s^2 * r_1^2$	13297500000
	r_1 радиус внутреннего полюсного сердечника (мм)	50
	B_s индукция в воздушном зазоре (Тл)	0,5
(4)	2. Уравнение магнитной цепи	
	$n * I = \frac{2 * 10^6 * B_s * S}{\mu} + 79 * 10^2 * r_1$	396000
	μ магнитная проницаемость воздуха (Гн/м)	1
	S величина воздушного зазора между корпусом и захвата и стальным листом борта (мм)	0,001
(5)	Нагрев не более $\theta = 50^\circ \dots 60^\circ$	
	$\theta = \frac{q * p_\theta}{2 * K_t * f * (r_1 - r_2)} * \left[\frac{n * I}{h} \right]^2 \leq 60^\circ$	237600
	h высота катушки (мм)	100
	p_θ удельное сопротивление медной проволоки (ом*м)	1
	r_1 радиус внутреннего полюса сердечника (мм)	50
	r_2 радиус внешнего полюса сердечника (мм)	49
	q коэффициент относительной продолжительности включения	1
	f коэффициент заполнения медью	3
	K_t коэффициент теплоотдачи = $8^\circ \dots 15^\circ$	11

Рис. 3. Элемент автоматической системы расчета для моделирования узлов швартовного устройства

Таблица 1

Сравнительная таблица АШУ		
Наименование	Положительные черты	Отрицательные черты
Вакуумное швартовное устройство	-Возможность обслуживания корпусов судов, изготовленных из различных материалов	- Высокая степень сложности исполнения АШУ; -Частый сервис; -Общие большие габариты АШУ; -Ограниченная сила притяжения на единицу поверхности и пониженная точность базирования из-за эластичных присосок; -Долгий период осуществления присасывания; -Короткий период эксплуатации некоторых узлов.
Электромагнитное швартовное устройство	-Простота конструкции; -Малые габариты для всей установки; -Большой период между ТО и нетрудоемкий сервис; -Большая сила притяжения на единицу поверхности; -Высокая точность базирования благодаря жесткости сердечника; -Быстрота примагничивания к поверхности; -Более долгий период эксплуатации, благодаря долговечности конструкции.	-Отсутствие возможности выполнения операций с немагнитными судами; -Нагрев катушки.

Предел текучести [Н/мм ²]	235
Модуль упругости нормальный [Н/мм ²]	200000
Коэффициент Пуассона	0.3
Плотность [кг/мм ³]	0.000008
Температурный коэффициент линейного расширения [1/°C]	0.000012
Теплопроводность [Вт/(°C*мм)]	0.000055
Предел прочности при сжатии [Н/мм ²]	410
Предел прочности (Временное сопротивление) [Н/мм ²]	410
Предел выносливости при растяжении [Н/мм ²]	209
Предел выносливости при кручении [Н/мм ²]	139

Рис. 4. Элемент отчета по имитационному эксперименту (содержит параметры материала элементов экспериментальной конструкции)

Обсуждение результатов анализа существующих конструкций швартовых устройств

Используя систему инженерного моделирования АСКОН Компас, воспроизведем конструкции автоматизированных швартовых устройств, которые являются внедренными устройствами как на причалах, так на судах для осуществления бункеровки, с целью оценки существующих аналогов на потенциальных безэкипажных буксирных судах (см. рисунок 5 – 8).

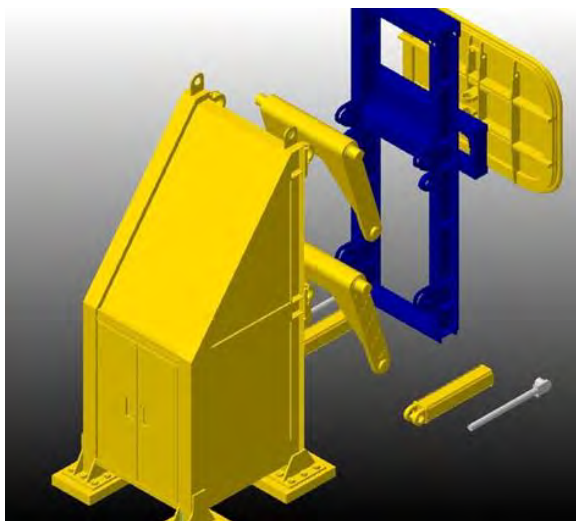


Рис. 5. Модель ВАСУ в АСКОН Компас

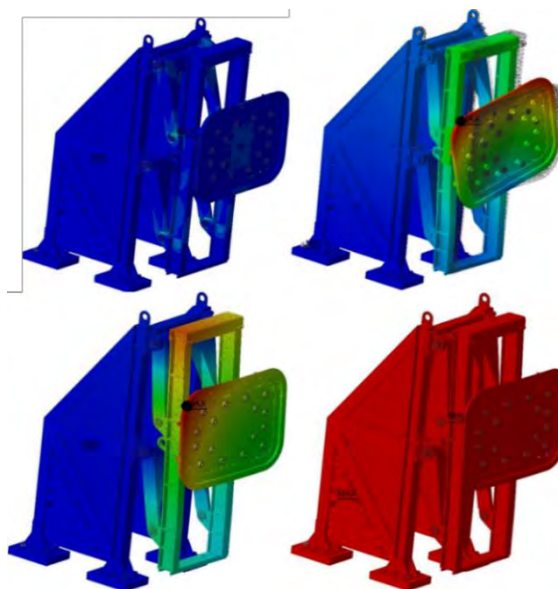


Рис. 6. Этап эксперимента на устойчивость ВАСУ в APM FEM

Необходимо отметить, что суть имитационного эксперимента заключается в прослеживании динамики деформации, концентрации напряжения, усталости и др. Для этого нет необходимости устанавливать точные материалы для моделей сборочной конструкции, как у их оригиналов. Поэтому были присвоены конструктивным элементам свойства материала, указанные из элемента отчета по имитационному эксперименту (см. рисунок 4).

Имитация показала, что у существующий конструкций отсутствует возможность без отстыковки компенсировать различные типы качки, а некоторые конструкции, которые напоминают манипуляторное устройства, из-за возникающего момента в плече могут создать аварийную ситуацию в виду нарушения целостности металлоконструкции.

Имитация продемонстрировала высокую концентрацию напряжения в металлоконструкции, вызванного различными усилиями и моментами, возникающими при выполнении морских операций. На основании полученных результатов выведем требования к конструкции автоматизированного швартовного средства:

- необходимое количество степени свободы для компенсации качки, прижима, отжима и продольного смещения при необходимой жесткости конструкции;
- простота исполнения с целью уменьшения вероятности поломки (упор в механические связи), простоты сервисного обслуживания.

Согласно критериям, очевидно, что разработать устройство, основанное исключительно на механической работе и без использования автоматики, невозможно. Необходимую надежность можно достичь при использовании гидравлических узлов с регулированием давления посредством контроллеров для обеспечения положения узла стыковки в пространстве, амортизации движения.

С помощью любых технических средств, в частности, с помощью которых были воспроизведены описанные автоматические швартовные устройства, можно определить допустимые профили металлоконструкций, осуществить ряд имитационных экспериментов для сбора статистических данных и определения оптимальной конструкции с учетом исходных параметров [7, 8].

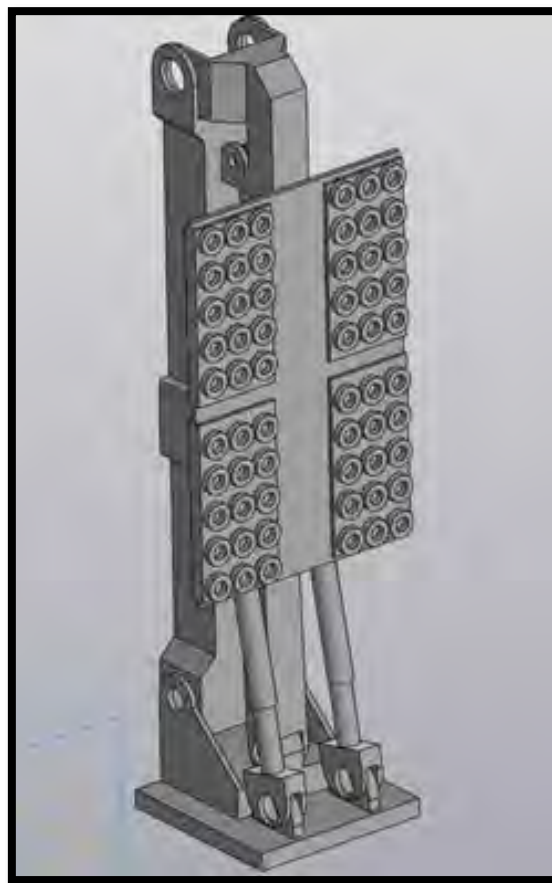


Рис. 7. Модель ЭМШУ в АСКОН Компас



Рис. 8. Этап эксперимента на устойчивость ЭМШУ в APM FEM

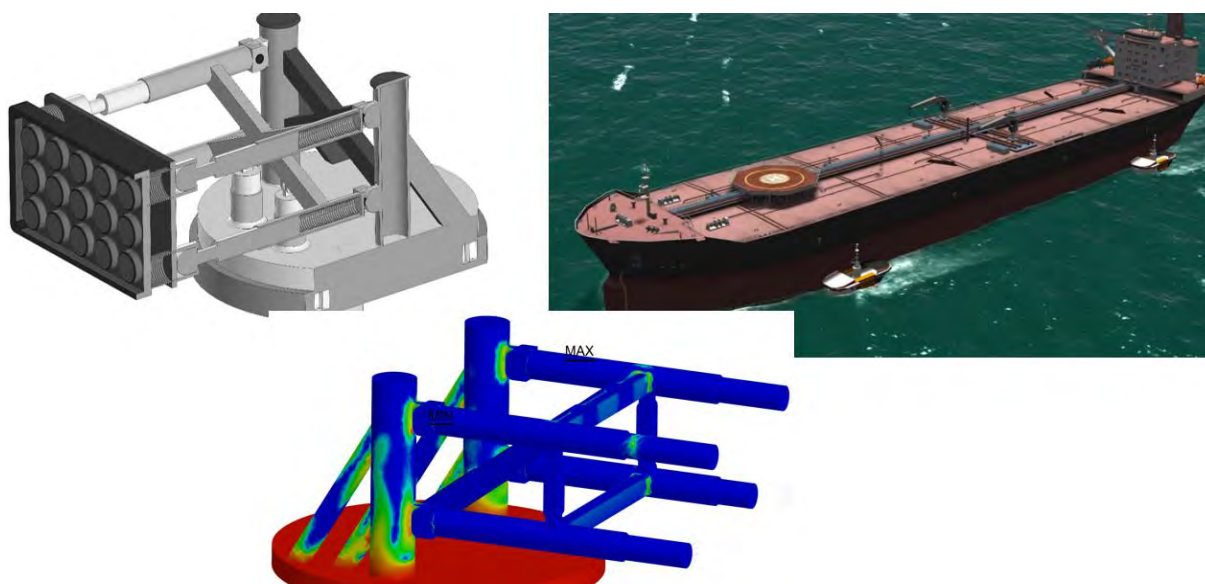


Рис. 9. Полезная модель швартового устройства

Заключение

Эксперименты показали, что описанные конструкции нельзя применять при выполнении комплекса морских операций, осуществляемых буксирами – раскантовка, эскорт, швартовка, по причине отсутствия надежности в них, которая обосновывается силами и моментами, которые можно было бы конструктивно компенсировать. Кроме того, стоит отметить технологическую сложность для конструкции, рассмотренной на рисунке 6 («Mampaey Offshore Industries»).

С целью компенсации качки, манипулятор осуществляет «перешагивающее движение», таким образом одномоментно снижая надежность «сцепки». А для достижения высокой надежности маневров с применением данной конструкции, необходимо размещения большого количества устройств, что можно достигнуть на причальном сооружении, но не на борту буксира.

Таким образом, существующие разработанные конструкции для вакуумных и магнитных автоматизированных швартовых устройств не способны обеспечить безопасное и надежное морское маневрирование автономных буксиров совместно с грузовым судном.

Оптимальным выбором конструкции может быть запатентованный вариант полезной модели в научно-исследовательской лаборатории «Автоматизация судовождения» [10], в основе которой лежат механические связи, обеспечивающие необходимые степени свободы, тяговое усилие с любым узлов стыковки. Данная модель обладает высокой надежностью благодаря комбинациям металлоконструкций (см. рисунок 9), а именно (согласно описания в патенте):

- Использование в качестве горизонтальных механизмов, которые удерживают пластины, телескопических пружинных устройств;
- Для изменения положения пластины по вертикали использовать гидравлические механизмы;
- Для большей подвижности пластины с магнитами и промежуточной пластины, осуществляется

крепление между ними и к штокам горизонтальных стоек с помощью шаровых шарниров и амортизирующих пружин.

- Основание на котором находится конструкция вращается, для того, чтобы осуществлять операции лагом, «на укол», под углом.

Для предложенного швартового устройства проводились имитационные испытания жесткости конструкции. На ранних моделях конструкции при имитациях были выявлены зоны повышенной концентрации напряжения (см. рисунок 10), что было решено путем изменения геометрии профилей, увеличения жесткости путем конструктивных решений. Была проведена работа с весом конструкции, посредством изменения общей геометрии с сохранением необходимых показателей надежности, удовлетворяющие целям выполнения искомых морских маневров. Кроме того, проводились имитационные испытания на судовом тренажере (см. рисунок 9), где использовались концептуальные модели автономных буксиров и с наложением физики и осуществлялись швартовые операции, раскантовка, эскортирование.

Таким образом, согласно комплекса результатов определяем критерии, согласно которых должны формироваться новые устройства для развивающегося типа судов:

- Достижение наибольшего количества степеней свободы;
- Возможность компенсации качки при выполнении операций или взаимодействия с возникающими амплитудами таким образом, чтобы не нанести вред ни судну со швартовым устройством, ни буксируемому судну;
- Невысокий вес конструкции;
- Простота в эксплуатации, в частности, из-за использования на безэкипажных (автономных) судах;
- Использование вакуумной подушки, электромагнитов, электропостоянных магнитов – является индивидуальным выбором;
- Учетывание при проектировании конструкции специфики выполнения швартовых операций, эскортирования, раскантовки.

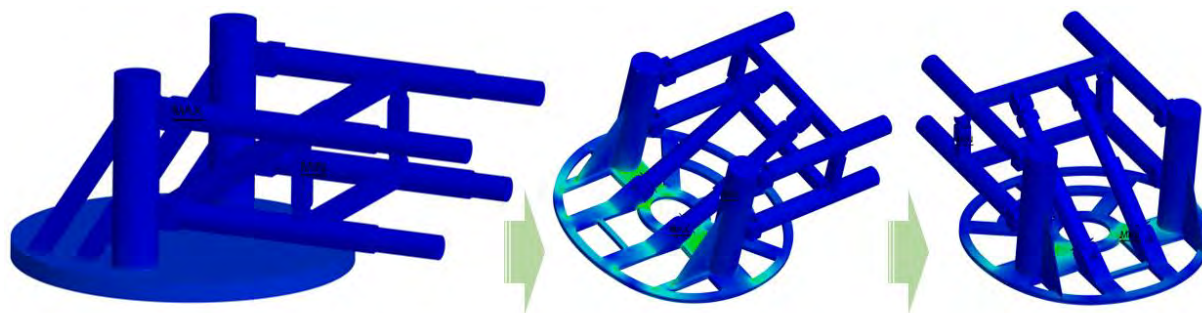


Рис.10. Этапы обновления конструкции по итогу имитации (имитации проводились в АСКОН Компас).

Литература

1. Епихин А.И., Хекерт Е.В., Модина М.А. Анализ безопасности безэкипажных судов на основе структуры модели риска с использованием сети байеса. *Морские интеллектуальные технологии*. 4(2). С. 38-46
2. Конвенция о Международных правилах предупреждения столкновений судов в море (МППСС-72) (с изменениями на 29 ноября 2001 года) *Официальный интернет-портал правовой информации* www.pravo.gov.ru, 24.11.2016, N 0001201611240015.
3. Golovina A. On the issue of the legal status of persons exercising control of a maritime autonomous surface vessel. *SHS Web Conf. 14th Session of Euro-Asian Law Congress The value of law*. 2021. V.134. p 00114
4. Патент РФ - Способ высокоточного определения навигационных элементов движения судна. № 2643072 от 14.06.2016 г.
5. V. V. ZaslonoV, V. G. Senchenko, A. A. Butsanets. Description of Sea Maneuvers Performed by a Group of Automatic Tugs Using the Flock Method. *Transportation Research Procedia*. 12, Irkutsk-Krasnoyarsk, 06–08 октября 2021 года. Irkutsk-Krasnoyarsk, 2022. P. 347-353. DOI 10.1016/j.trpro.2022.01.056.
6. Бабурина О.Н., Ботнарчук М.В., Кондратьев С.И. Интеллектуальные проблемы реализации дорожной карты развития морской отрасли России («MariNet») в рамках Национальной технологической инициативы. *Морские интеллектуальные технологии*. 2018. № 3 (41). С. 190-198
7. Ботнарчук М. В., Тимченко Т. Н., Тонконог В. В. Проблемные аспекты оказания медицинской помощи на борту морского судна членам экипажа. Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. 2021. 29(5):1125—31.
8. Юдин Ю.И., Позняков С.И. Прогнозирование изменения курса судна в процессе маневрирования. *Морские интеллектуальные технологии*. 2022. № 2-1(56). С. 238-244.
9. Епихин, А. И. Модина М. А. Проблемы внедрения безэкипажных судов на основе статистических исследований аварийных ситуаций и потерь судов. *Морские интеллектуальные технологии*. 2021. № 3-1(53). С. 77-82. DOI 10.37220/MIT.2021.53.3.010.
10. Патент на полезную модель № 215135 U1 Российская Федерация, МПК В63В 21/02. поворотный буксирный швартовный механизм : № 2022119532 : заявл. 15.07.2022 : опубл. 30.11.2022 / В. Г. Сенченко, А. Б. Крючков, В. В. Заслонов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова"
11. Абрамян С.К., Голубкина К.В. Межведомственное взаимодействие органов управления водным транспортом Российской Федерации. *Морские интеллектуальные технологии*. 2019. № 1-2(43). С. 82-85.
12. Заслонов В.В., Головина А.А. Инструмент диагностики, мониторинга элементов и систем безэкипажного судна с применением AR-функционала. *Морские интеллектуальные технологии*. 2022. № 4 часть 1, С. 228—235

References

1. Aleksey I. Epikhin, Evgeniy V. Heckert, Marina A. Modina. Analysis of the safety of unmanned vessels based on the structure of the Bayes network-based risk model, *Marine intellectual technologies*. 2021. № 2 part 4. P. 38—46.
2. Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs-72) (as amended on November 29, 2001) Official Internet portal of legal information www.pravo.gov.ru, 24.11.2016, N 0001201611240015
3. Golovina A. On the issue of the legal status of persons exercising control of a maritime autonomous surface vessel. *SHS Web Conf. 14th Session of Euro-Asian Law Congress The value of law*. 2021. V.134. p 00114.
4. Patent of the Russian Federation - Method for high-precision determination of the navigational elements of the ship's movement. No. 2643072 dated 06/14/2016
5. V. V. ZaslonoV, V. G. Senchenko, A. A. Butsanets. Description of Sea Maneuvers Performed by a Group of Automatic Tugs Using the Flock Method. *Transportation Research Procedia*. Irkutsk-Krasnoyarsk, 2022. P. 347-353. DOI 10.1016/j.trpro.2022.01.056.
6. Olga N. Baburina, Marina V. Botnaruyk, Sergey I. Kondratiev. Intellectual problems of implementing road map for development of russian marine industry (marinet) in the framework of national technological initiative, *Marine intellectual technologies*. 2018. № 3 part 1. P. 190 – 198.

7. Botnariuk M. V., Timchenko T. N., Tonkonog V. V. Problematic aspects of providing medical care on board a ship to crew members. Problemy sotsial'noy gigiyeny, zdravookhraneniya i istorii meditsiny. Problems of Social Hygiene, Health Care and the History of Medicine. 2021. 29(5). 1125–31.
8. Yuri I. Yudin, Sergey I. Poznjakov. Forecasting variable course in the process of maneuvering, *Marine intellectual technologies*. 2022. № 2 part 1. P. 238—244.
9. Aleksey I. Epikhin, Marina A. Modina. Problemy vnedrenia bezekipazhnikh sydov na osnove statisticheskikh issledovaniy avariynikh [Problems of implementation of unmanned ships based on statistical studies of accidents and losses of ships]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. № 3-1(53). S. 77-82. DOI 10.37220/MIT.2021.53.3.010.
10. Patent RF № 215135 U1, МПК В63В 21/02. Povorotnyy buksirnyy shvartovnyy mekhanizm [Swivel towing mooring mechanism]: № 2022119532 : declared. 15.07.2022 : published 30.11.2022 / V. G. Senchenko, A. B. Kryuchkov, V. V. Zaslono; declarer Admiral Ushakov State Maritime University
11. Abramyan S. K., Golubkina K. V. Mezhdedomstvennye vzaimodeystviya organov upravleniya vodnym transportom Rossiyskoy Federatsii [Interdepartmental interactions of water transport management bodies of the Russian Federation]. Morskie Intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 1-2 (40), pp. 82-85.
12. Zaslono V.V., Golovina A.A. Заслонов В.В., Головина А.А. Instrument diagnostiki, monitoringa elementov I system bezakipazhnogo sudna s primeneniem AR-funkchionala. [Instrument for diagnostics, monitoring of elements and systems of an unmanned vessel using AR-functionality]. Morskie Intellektual'nye tekhnologii. № 4 part 1, pp. 228—235

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

Заслонов Владимир Валерьевич, мл. научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Автоматизация судовождения» «Государственный морской университет имени адм. Ф.Ф. Ушакова», Россия, г. Новороссийск, пр.Ленина, д.93, e-mail: djdf3d@yandex.ru

Vladimir V. Zaslono. researcher of the research laboratory "Automation of Navigation», Admiral Ushakov State Maritime University, Russia, Novorossisk, Lenin's avenue, 93, e-mail: djdf3d@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.10.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.01.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 18.01.2024.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Научная статья

УДК 537.312; 539.182

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.031>

Квантово-механический подход к эффекту туннелирования и трансляционной диффузии протонов в кристаллических материалах

Тимохин В.М.¹ a_t.v.m@inbox.ru, Теджетов В.А.² Velmurad@yandex.ru

¹Государственный Морской Университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск,

²Национальный исследовательский технологический университет, «МИСиС», Москва

Аннотация. Интенсивное использование северного морского пути для перевозки грузов гражданским и военным флотом при низких температурах требует производства новых материалов. Водородные связи и трансляционная диффузия протонов, а также связанные с ними протонные образования заметно влияют на структуру и рабочие свойства кристаллических материалов, применяемых на морских судах, поэтому изучение этих параметров представляет актуальную проблему. В соответствии с этим исследование протонной электрической проводимости через структуру кристаллов при низких температурах и изучение возможности проникновения протонов через потенциальный барьер на основе квантово-механического подхода и представляет собой цель данного исследования. В статье представлены экспериментальные и теоретические исследования кристаллических материалов типа кристаллов гидросиликата магния $Mg_3[Si_4O_{10}][OH]_2$, мусковита $KAl_2[AlSi_3O_{10}][OH]_2$, флогопита $KMg_3[AlSi_3O_{10}][F,OH]_2$ и иодата лития $\alpha-LiIO_3$. Исследовались спектры термостимулированных токов деполяризации и температурно-частотные спектры $tg\delta = f(v,T)$ в диапазоне температур (77...473) К, по которым рассчитаны энергия активации и концентрации релаксаторов, вызывающих появление максимумов. Определена прозрачность потенциального барьера для протонов при температурах ниже нуля. Энергия активации низкотемпературного максимума ТСТД (0.05...0.07) эВ хорошо совпадает с энергией активации протонов 0.054 эВ из ЯМР-спектров, что свидетельствует о том, что диффузия при низких температурах обусловлена переходом протонов между ионами кислорода в тетраэдрах SiO_4^{4-} или октаэдрах IO_3^- . В итоге мы предложили механизм трансляционной диффузии протонов вдоль оси $Z(C_6)$ в направлении электрического поля, что представляется весьма перспективным для создания новых протонных проводников и протонных мембран, а также в оптоэлектронике и лазерной технике.

Ключевые слова: Туннелирование, трансляционная диффузия, кристаллические материалы, термостимулированные токи, ИК-спектры, прозрачность барьера.

Для цитирования: Тимохин В.М., Теджетов В.А. Квантово-механический подход к эффекту туннелирования и трансляционной диффузии протонов в кристаллических материалах, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 259—269. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.031

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.031>

Quantum-mechanical approach to the tunneling effect and translational diffusion of protons in crystalline materials

Viktor M. Timokhin¹ a_t.v.m@inbox.ru, Valentin A. Tedzhetov² Velmurad@yandex.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

²National University of Science and Technology «MISS», Moscow, Russian Federation

Abstract. Intensive use of the northern sea route for cargo transportation by civil and military fleets at low temperatures requires the production of new materials. Hydrogen bonds and translational diffusion of protons, as well as related proton formations, noticeably affect the structure and working properties of crystalline materials used on marine vessels, so the study of these parameters represents an urgent problem. Accordingly, the study of proton electrical conductivity through the structure of crystals at low temperatures and the study of the possibility of proton penetration through the potential barrier on the basis of quantum mechanical approach is the aim of this study. This paper presents experimental and theoretical studies of crystalline materials such as magnesium hydrosilicate $Mg_3[Si_4O_{10}][OH]_2$, muscovite $KAl_2[AlSi_3O_{10}][OH]_2$, phlogopite $KMg_3[AlSi_3O_{10}][F,OH]_2$ and lithium iodate $\alpha-LiIO_3$ crystals. The spectra of the thermal-stimulated depolarization currents and temperature-frequency spectra $tg\delta = f(v,T)$ in the temperature range (77...473) K were studied, from which the activation energy and concentrations of relaxants causing the appearance of maxima were calculated. The transparency of the potential barrier for protons at temperatures below zero was determined. The activation energy of the low-temperature maximum of TSDC (0.05...0.07) eV coincides well with the proton activation energy of 0.054 eV from NMR spectra, indicating that the diffusion at low temperatures is due to the transition of protons between oxygen ions in tetrahedra SiO_4^{4-} or octahedra IO_3^- . As a result, we proposed a mechanism of translational diffusion of protons along the $Z(C_6)$ axis in the direction of the electric field, which seems

to be very promising for the creation of new proton conductors and proton membranes, as well as in optoelectronics and laser technology.

Keywords: Tunneling, translational diffusion, crystalline materials, thermally stimulated currents, infrared spectra, barrier transparency.

For citation: Viktor M. Timokhin, Valentin A. Tedzhetov, Quantum-mechanical approach to the tunneling effect and translational diffusion of protons in crystalline materials, Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 259—269. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.031

Введение

Использование и производство кристаллических материалов для работы в ядерных установках ледоколов и в качестве лазерных створов для судовой навигации требует систематического контроля их состояния. Водородные связи оказывают большое влияние на структуру и рабочие свойства материала. Поэтому исследование трансляционной диффузии протонов в кристаллических материалах и разработка неразрушающих методов их диагностики является актуальной проблемой.

В классической механике вероятность обнаружить частицу, в частности протон, в координате с энергией, величина которой меньше высоты потенциального барьера, близка к нулю. В этом случае переход протона внутрь потенциального барьера нарушал бы закон сохранения энергии. Однако в квантовой механике такая ситуация возможна, так как для микроскопических частиц типа протона выполняется принцип неопределённости, согласно которому нельзя с большой точностью одновременно определить координаты и импульс частицы. Благодаря тому, что частицы малого размера не имеют определённого положения в пространстве, для них не существует понятия траектории, то есть частица может обходить энергетически запрещённые области. Это связано с тем, что её состояние можно описать с помощью волновой функции, характеризующей распределение вероятности по координате.

Следовательно, невозможно говорить об одновременном определении потенциальной и кинетической энергии, как функции координаты и импульса. Попробуем провести анализ определения этих величин для протона. Предположим, что протон оказался за барьером шириной $d = 1,2 \text{ \AA}$, что для изученных кристаллов представляет реальную величину. При неопределённости в определении координаты $\Delta x = d$ импульс определяется с неопределённостью $\Delta p \geq \frac{\hbar}{d}$. Отсюда можно оценить неопределённость энергии $\Delta E = \frac{(\Delta p)^2}{2m}$ и вероятность прохождения протона массой m через барьер шириной d .

В связи с этим основной целью работы является исследование механизма диффузии протонов через структуру кристаллов и определение вероятности туннелирования протонов в средней части потенциального барьера с точки зрения квантовой теории, используя экспериментальные спектры термостимулированных токов деполаризации (ТСТД), $\text{tg } \delta = f(v, T)$, ИК и ЯМР спектров.

Участие протонов в объёмной проводимости изучается давно, в частности в работе [1], где рассмотрена миграция ионов H^+ в структуре кристаллов ниобата лития при температуре

(293...463) К, сопровождающееся встречной диффузией ионов Li^+ , которая имеет место при высоких температурах. Поэтому о туннелировании протонов при высоких температурах говорить не приходится. Определение объёмной концентрации протонов в кристаллах LiNbO_3 проводилось на основании исследования ИК-поглощения при $\lambda = 2870 \text{ нм}$. В итоге получена концентрация $8,8 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$. При этом считается, что вклад в ИК-поглощение вносят как OH^- группы, так и ионы H^+ . В наших экспериментах для кристаллов LiIO_3 при температуре 145 К концентрация протонов H^+ и ионов H_3O^+ равна $1,2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$, а при температуре 352 К, соответственно, $8 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ [2], что хорошо коррелирует с кристаллами ниобата лития.

Группа учёных из Манчестерского университета под руководством профессора Андрея Гейма доказали, что пластинка слюды толщиной в (10...15) диаметров атомов является хорошим протонным проводником и может использоваться в изготовлении протонных мембран. Исследователи показали, что протоны могут легко проходить через тонкие слои слюды несмотря на то, что они в десять раз толще графена [3]. Пакет слюды, по аналогии с графитом, состоит из множества плотно уложенных пластинок, которые можно разделить до одного-двух слоёв толщиной 5 мкм. Ученые установили, что такой слой в сотни раз более проницаем для протонов, чем у графена. Поверхностная электрическая проводимость тонкослойных слюд может достигать более 100 См при 500 °С. Предполагалось, что быстрое движение протонов связано с их диффузией по трубчатым каналам шириной ~5 Å, которые перфорируют кристаллическую структуру слюды. В итоге кристаллы слюды после ионного обмена содержат внутри себя группы оксония H_3O^+ и гидроксильные группы OH^- [3], которые мы наблюдали во многих экспериментах.

Лед, являясь идеальной моделью кристаллов с водородными связями, включает в себя ионные дефекты H_3O^+ и OH^- , а также ориентационные дефекты валентной связи D и L : если два протона валентно связаны с ионом кислорода, образуется D -дефект, при пустой водородной связи образуется L -дефект [4]. Здесь возникают вакансии L -дефекта (VL), соответствующих пустой валентной связи молекулы воды. В слюдах концентрация дефектов H_3O^+ немногим меньше их концентрации в воде, где она составляет величину $1,1 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ [4]. В пленках протонобменных мембран типа Нафион материалы стенки содержат протоны и способны высвобождать их в пустые связи тонких прослоек воды, находящихся в наноразмерном состоянии. В слюдах размер элементарной ячейки также составляет около 1 нм.

1. Методика и результаты эксперимента

1.1. Материалы и оборудование

Для исследований были выбраны природные слоистые кристаллы гидросиликата магния $Mg_3[Si_4O_{10}][OH]_2$, слюд мусковита $KAl_2[AlSi_3O_{10}][OH]_2$ и флогопита $KMg_3[AlSi_3O_{10}][F,OH]_2$, кристаллогидраты сульфата кальция $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (все моноклинная сингония, точечная группа $2/m$ – призматическая, спайность весьма совершенна по $\{001\}$, несовершенная по $\{110\}$ и $\{010\}$) (рис. 1).

Кроме того были проведены исследования гексагональных кристаллов иодата лития $\alpha-LiIO_3$, имеющие совершенную спайность по кристаллографической плоскости $(10\bar{1}0)$, (пространственная группа $R\bar{6}_322$ или C_6), выращенные методом открытого испарения в H_2O и D_2O с добавлением иодноватой кислоты HIO_3 ,

обеспечивающей водородную связь за счёт роста концентрации протонов, что хорошо согласуется с результатами, полученными в работах [2,5]. Указанные кристаллы, (см. рисунок 1) объединяет то, что они в той или иной степени обладают водородными связями и широко применяются как при изготовлении пазовой и витковой изоляции судовых генераторов, так и в качестве лазерных створов для проводки судов.

Кристаллическая структура слюды является перфорированной, что обусловлено диффузией протонов по микроканалам, что хорошо заметно на скане слюды флогопита на электронном микроскопе (рис.2) [6].

При исследовании ТСТД применялось запатентованное многофункциональное устройство для исследования физико-технических характеристик материалов при температурах (77...473) К и частотах поля (1...10⁸) Гц [6].

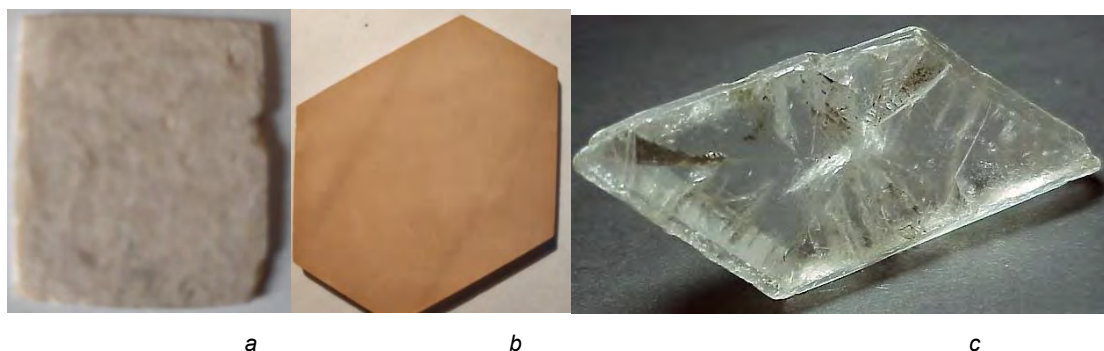


Рис. 1. Образцы для исследования: а – гидросиликат магния; б – иодат лития; с – кристаллогидрат сульфата кальция

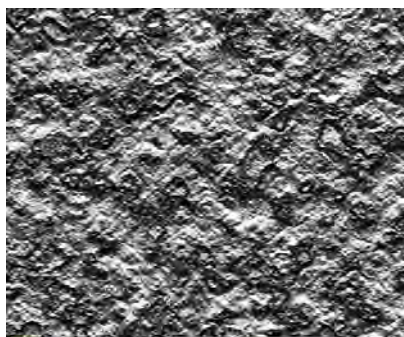


Рис. 2. Изображение поверхности слюды флогопита на сканирующем электронном микроскопе

Скорость естественного нагрева образца как правило поддерживалась (0,5...1) К/мин. Давление внутри установки (10⁻⁴...10⁻⁵) мм. рт. ст. обеспечивалось при помощи форвакуумного и диффузионного насосов. Для регистрации результатов применялся сверхчувствительный цифровой вольтметр - электрометр В7-30 с двойным экранированным кабелем для измерения силы тока в диапазоне (10⁻⁶...10⁻¹⁵) А. Погрешность измерений на данном устройстве составляет: по силе тока $\pm 0,5 \cdot 10^{-15}$ А, по электроёмкости – 2%. Измерители импеданса ВМ - 538 и ВМ - 507 фирмы Tesla применялись для измерения $\tan \delta$ с точностью $\pm 0,5 \cdot 10^{-4}$. Исследования ЯМР-спектров проводились на ЯМР-спектрометре AVANCE IIIITM 300 (фирмы BRUKER).

1.2. Эффект туннелирования и трансляционной диффузии протонов с точки зрения квантово-механической теории

Общепринятый вид волновой функции показан на рисунке 3 при туннелировании протона с энергией E через потенциальный барьер высотой U_0 . В средней части барьера в области 2 волновая функция уменьшается по экспоненциальной зависимости. Вероятность найти частицу в конкретной точке барьера равна квадрату волновой функции [7]

$$\psi^2 = D_0 \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(U_0 - E)}d\right) \quad (1)$$

Чтобы найти частицу с максимальной вероятностью, необходимо искать её на таком расстоянии от барьера или внутри его, где предэкспоненциальный множитель имеет порядок единицы, то есть

$$\frac{2d}{\hbar} \sqrt{2m(U_0 - E)} \approx 1 \quad (2)$$

Тогда ширина барьера определяется как $d \approx \frac{\hbar}{2\sqrt{2m(U_0 - E)}}$, и мы получим неопределённость в определении импульса $\Delta p \geq 2\sqrt{2m(U_0 - E)}$. В этом случае выполняется неравенство

$$\frac{(\Delta p)^2}{2m} \geq 4(U_0 - E) \quad (3)$$

Следовательно, дополнительная энергия, получаемая протоном при изменении его координаты, окажется выше разности между высотой

потенциального барьера и кинетической энергии частицы, следовательно появление частицы внутри барьера не противоречит закону сохранения энергии. Учитывая, что $\frac{\hbar}{d} \leq \Delta p$, получим из (3)

$$\left(\frac{\hbar}{d}\right)^2 \frac{1}{2m} < 4(U_0 - E). \quad (4)$$

Оценим сначала левую часть

$$\left(\frac{1,055 \cdot 10^{-34}}{1,2 \cdot 10^{-10}}\right)^2 \frac{1}{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}} = 2,3 \cdot 10^{-22} \text{ Дж}$$

или 0,0014 эВ.

Как видно из эксперимента, представленного на рисунках 4 и 5, низкотемпературный максимум №1 ТСТД хорошо заметен при напряжённостях поляризующего поля $E_p = (10^5 \dots 10^6) \text{ В/м}$. Это значит, что как раз при таких значениях напряжённости электрического поля протон может получить достаточную энергию для туннельного перехода через потенциальный барьер. Для исследованных нами кристаллов высота потенциального барьера при температурах (85...122) К оказалась равной $U_0 = (0,06 \dots 0,11) \text{ эВ}$, что доказано экспериментально из спектров ТСТД (см. таблицу 1).

Энергия активации определялась по методу начального подъёма Гарлика-Гибсона [6], согласно которого на начальном участке кривые тока ТСТД независимо от характера релаксационного процесса имеют вид:

$$I(T) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{U_a}{kT}\right)$$

Это выражение справедливо и для тока ТСТД, обусловленного размораживанием и переориентацией диполей. Это выражение показывает, что начальный участок тока ТСТД в координатах Аррениуса ($\ln I \sim 1/kT$) изображается в виде прямой линии, что позволяет графически вычислить энергию активации электрически активных дефектов.

При образовании ионного дефекта H_3O^+ , а также анионов HSiO_4^{3-} (в силикатах), HSO_4^- (в сульфатах) или HIO_3 (в иодатах) свободный протон имеет импульс $p = k\hbar$ и кинетическую энергию [8] в виде

$$E_k = \frac{p^2}{2m_p} = \frac{(k\hbar)^2}{2m_p} \quad (5)$$

Здесь волновое число $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ может принимать дискретные значения $k = \pm \left(\frac{\pi}{d}\right)n$, где $n = 1, 2, 3 \dots$. В этом случае протон также должен иметь дискретные значения энергии, то есть можно утверждать, что его энергия должна квантоваться.

$$E_k = \frac{\hbar^2}{2m_p} \left(\frac{\pi}{d}\right)^2 n^2 \quad (6)$$

Расчёт энергии протона в возбуждённом состоянии с $n = 2$ позволяет получить при $d = 0,12 \text{ нм}$ величину

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2} n^2 = 0,057 \text{ эВ}.$$

То есть для правой части уравнения (4) для максимумов 1 и 2 получим значение (0,012...0,212) эВ

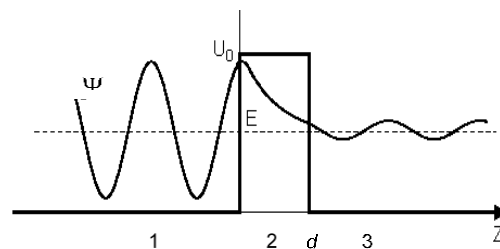


Рис. 3. Волновая функция в случае, когда энергия протона не превышает высоту потенциального барьера

Таблица 1

Параметры дефектов по спектрам ТСТД

№ максимума	$T_{\text{max}}, \text{ К}$	Энергия активации, $U_a, \text{ эВ}$	Концентрация, $n, \text{ м}^{-3}$	Вид релаксатора
Гидросиликат магния				
1	86	$0,06 \pm 0,01$	$5,7 \cdot 10^{17}$	H^+
2	112	$0,11 \pm 0,01$	$1,2 \cdot 10^{18}$	H_3O^+
3	180	$0,19 \pm 0,02$	$3,5 \cdot 10^{19}$	H_2O (кристаллогр.)
4	206	$0,25 \pm 0,02$	$1,8 \cdot 10^{19}$	H_2O (адсорбирован.)
5	230	$0,32 \pm 0,03$	$8,35 \cdot 10^{19}$	OH^-
6	252	$0,41 \pm 0,04$	$5,4 \cdot 10^{20}$	VL
7	305	$0,36 \pm 0,04$	$8 \cdot 10^{22}$	$\text{H}^+, \text{H}_3\text{O}^+, \text{OH}^-$
Флогопит				
1	88	$0,06 \pm 0,01$	$2,5 \cdot 10^{17}$	H^+
2	122	$0,11 \pm 0,01$	$1,2 \cdot 10^{18}$	H_3O^+
3	178	$0,21 \pm 0,02$	$5,7 \cdot 10^{19}$	H_2O (кристаллогр.)
4	206	$0,28 \pm 0,03$	$6,8 \cdot 10^{19}$	H_2O (адсорбирован.)
5	235	$0,39 \pm 0,04$	$7,2 \cdot 10^{19}$	OH^-
6	258	$0,48 \pm 0,04$	$3,2 \cdot 10^{20}$	VL
7	335	$0,35 \pm 0,04$	$7,6 \cdot 10^{22}$	$\text{H}^+, \text{H}_3\text{O}^+, \text{OH}^-$

Вне потенциального барьера (в областях 1 и 3, рис. 3) из уравнения (5) с учётом k выполняется соотношение

$$\frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (7)$$

При облучении кристаллов в процессе работы в них образуются как радиационные, так и ионные дефекты. Как видно из рисунков 5 и 6, в спектрах ТСТД [6] и термостимулированной люминесценции (ТСЛ) положение максимумов точно совпадают по температуре. Следовательно, в кристаллах иодата лития имеются как минимум 6...7 центров возбуждения, обусловленных протонами в протонных дефектах OH^- , H_3O^+ и H_2O , что подтвердилось при исследовании ИК-спектров [12]. Это свидетельствует о прямой связи колебательных процессов в термоактивационных и радиационных эффектах. Кристаллы с правильной решёткой, не имеющей искажений дефектами, практически не люминесцируют. Вещество обладает люминесцентными свойствами даже при концентрации примесных атомов или ионов 0,01 %. В твердых кристаллических телах под действием рентгеновского излучения возникает рекомбинационная люминесценция, при которой появляются неравновесные носители заряда.

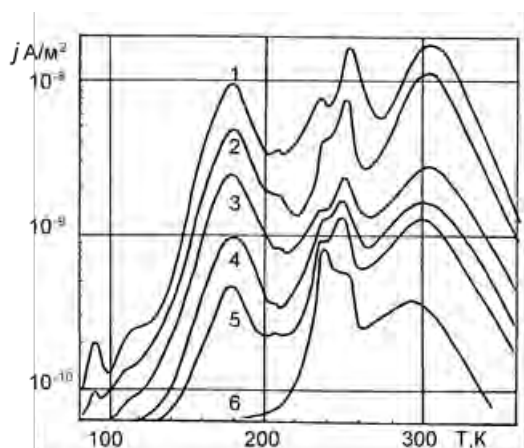


Рис. 4. Спектр плотности ТСТД гидросиликата магния от E_n , при температуре поляризации $T_n = 300 \text{ K}$: 1 – $2 \cdot 10^5 \text{ В/м}$; 2 – $1 \cdot 10^5 \text{ В/м}$; 3 – $5 \cdot 10^4 \text{ В/м}$; 4 – $2 \cdot 10^4 \text{ В/м}$; 5 – $1 \cdot 10^4 \text{ В/м}$; 6 – $2 \cdot 10^3 \text{ В/м}$

В этих случаях процесс люминесценции может включать захват носителей ловушками или подвижными дефектами с их последующим освобождением в процессе нагревания, то есть включать процесс, характерный для люминесценции. Как показал эксперимент (рис. 6) в создании люминесценции участвуют как раз дефекты, ответственные за появление релаксационных максимумов на спектрах ТСТД (рис. 5). Под действием рентгеновского излучения происходит эмиссия электронов, которые могут перейти в зону проводимости. Находясь в этой зоне, электрон движется по кристаллу до тех пор, пока либо не рекомбинирует с ионным дефектом, либо не будет захвачен ловушкой. В первом случае возникает люминесценция, что и наблюдается на рисунке 6.

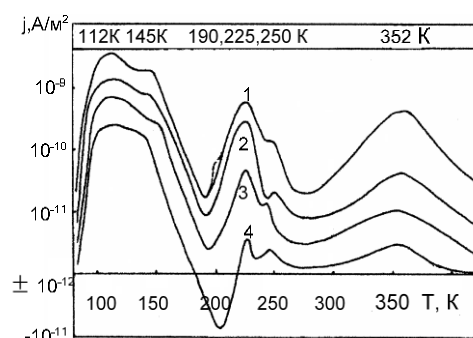


Рис. 5. Спектр плотности ТСТД монокристаллов α - LiIO_3 вдоль оси Z [0001] при $T_n = 323 \text{ K}$, $t_n = 10 \text{ мин}$, $d = 0,7 \text{ мм}$, диаметр электрода 25 мм при напряжениях: 1 – $8,5 \cdot 10^5 \text{ В/м}$; 2 – $4 \cdot 10^5 \text{ В/м}$; 3 – $2 \cdot 10^5 \text{ В/м}$; 4 – $5 \cdot 10^4 \text{ В/м}$

Часть электронов оказываются локализованными на центрах захвата (протонов, дефектов H_3O^+ , молекул H_2O). Захват электрона возможен только подвижным дефектом, то есть в момент его «размораживания», а это как раз и соответствует появлению максимумов на спектре ТСТД. Во втором случае свечения нет, так как энергия, выделяемая при захвате, расходуется на возбуждение колебаний кристаллической решётки, что способствует «размораживанию» релаксаторов. Таким образом, спектры ТСЛ полностью подтвердили наличие всех типов релаксаторов, существование которых мы доказали по температурным спектрам ТСТД.

В соответствии с уравнением (7), длина волны де-Бройля протона, прошедшего барьер, должна быть

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2mE}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,055 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 1,673 \cdot 10^{-27} \cdot 0,054 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}} = 1,2 \text{ Å} \quad (8)$$

Но, используя выражение для импульса протона, можно записать

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = \frac{h}{\sqrt{2m \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2} n^2}} = \frac{2d}{n} \quad (9)$$

Для энергии протона в основном состоянии получим $E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2} n^2 = 0,014 \text{ эВ}$, что близко к энергии активации 0,022 эВ релаксационного максимума tgδ при температуре (90...100) К и подтверждает участие протонов в туннелировании и релаксационном процессе. В этом случае получаем удивительный на первый взгляд результат из выражения (4) для 100 К получаем $0,0014 < 0,052$. Поэтому, в соответствии с законом сохранения энергии существует вполне реальная вероятность обнаружить протон за барьером. Чтобы подтвердить этот вывод, применим уравнение Шрёдингера для прямоугольного барьера [8] для нерелятивистского случая. При низких температурах кинетическая энергия ядер в узлах кристаллической решётки близка к нулю (или они совершают так-называемые «нулевые колебания») и в первом приближении можно считать, что протоны движутся в поле неподвижных ядер.

Кристаллы считаем бесконечно периодическими, то есть дальний порядок в них не нарушается, что позволяет использовать трансляционную симметрию. В этом случае движение протона можно описать уравнением плоской волны де-Бройля $f =$

$A \exp(ikx)$. Уравнение Шрёдингера, описывающего движение протона в периодическом поле неподвижных ядер, для трёхмерного случая имеет вид [9]

$$\frac{\hbar^2}{2m_p} \nabla^2 \psi(r) + U_0 \psi(r) = E \psi(r) \quad (10)$$

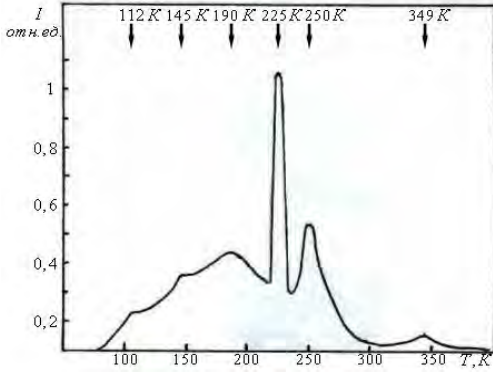


Рис. 6. Спектр ТСЛ кристаллов α -LiIO₃: $t_n = 1$ час, $U = 15$ кВ, $T_n = 80$ К. Облучение производилось на рентгеновской установке УРС – 2,0 с трубкой БСВ-2 (Cu, 40 кВ, 10 мА)

В одномерном случае, исходя из упрощённой теории ВКБ для прямоугольного барьера конечной величины, это уравнение можно записать в виде, соответствующим рисунку 3:

– внутри барьера с энергией U_0 при $0 < x < d$ (область 2)

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (U_0(x) - E) \psi = 0 \quad (11)$$

– перед барьером $x < 0$ и за ним $x > d$ (области 1 и 3) $U_0 = 0$. В итоге получим

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0 \quad (12)$$

В результате решения уравнения Шрёдингера можно получить вероятность появления частицы внутри барьера, то есть оценить прозрачность барьера D [9]

$$D = \frac{k^2 \chi^2}{(k^2 + \chi^2)^2 \left(\frac{1}{2} \sinh \chi d \right)^2 + k^2 \chi^2} \quad (13)$$

Здесь приведены обозначения

$$k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \chi = \frac{\sqrt{2m(U_0 - E)}}{\hbar} \quad (14)$$

Разделим числитель и знаменатель (13) на $(k\chi)^2$ и, учитывая, что гиперболический синус можно разложить в ряд по экспоненте $\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$, для коэффициента прозрачности получим

$$D = \left(\frac{1}{16} \left(\frac{k}{\chi} + \frac{\chi}{k} \right)^2 (e^{\chi d} - e^{-\chi d})^2 + 1 \right)^{-1} \quad (15)$$

После подстановки (14) в (15) получаем для коэффициента прозрачности

$$D = \left[\frac{1}{16} \left(\sqrt{\frac{U_0}{E} - 1} + \sqrt{\frac{U_0}{E} - 1} \right)^2 (e^{\chi d} - e^{-\chi d})^2 + 1 \right]^{-1}$$

Считается, что процесс туннелирования может происходить через барьеры шириной не более (1...3) нм. Здесь для протона при энергии $E = 0,057$ эВ,

высоте барьера $U_0 = 0,07$ эВ, ширине барьера $d = 0,12$ нм и $m_p = 1,6727 \cdot 10^{-27}$ кг получим $\chi = 2,501 \cdot 10^{10}$, откуда $e^{2\chi d} = 403,2$. В этом случае выражение для D в хорошем приближении примет вид

$$D = \left[\frac{1}{16} \left(\sqrt{\frac{U_0}{E} - 1} + \sqrt{\frac{U_0}{E} - 1} \right)^2 e^{2\chi d} + 1 \right]^{-1} \quad (16)$$

Тогда прозрачность барьера будет $D = 0,0075$. Для энергии 0,06 эВ получим $\chi = 1,20 \cdot 10^{10}$, $e^{2\chi d} = 17,85$, то $D = 0,0408$. Для ширины барьера $d = 0,15$ нм при $U_0 = 0,07$ эВ прозрачность барьера $D = 0,00042$, то есть проникаемость барьера сильно зависит от его ширины и высоты [12]. Результаты хорошо коррелируют с выводами работ [10,11], где в спектрах неупругого рассеяния нейтронов гидрида α -MnH_{0.07} при температурах ниже 100 К наблюдались оптические пики водорода при энергиях 0,073 и 0,107 эВ. Неупругое рассеяние нейтронов обеспечивает уникальный метод исследования колебательной и квантовой туннельной динамики водородсодержащих материалов. Авторы [10], исследуя зависимость интенсивности пика от температуры, переданного импульса и изотопического замещения, показали, что исследованный пик обусловлен туннелированием протонов, причём предположили, что причиной расщепления этого туннельного пика может быть обусловлено дефектами кристаллической решётки кристаллов α -Mn.

Полученные в [10,11] данные хорошо коррелируют с нашими результатами для энергии активации 0,022 и 0,1 эВ для спектра $\lg \delta = f(v, T)$, что видно из рисунка 7 и таблицы 2, а также 0,05 эВ и 0,10 эВ в таблице 1 для максимумов спектров ТСТД изученных кристаллов и для ИК-спектров в работах [12,13]. В работе [14] проведены исследования рассеяния нейтронов в кристалле гидрокарбоната калия KНСО₃, подтверждающие существование макроскопических квантовых корреляций, от криогенных до комнатных температур. При исследовании дифракционной картины определена энергия активации протонов в кристаллах KНСО₃ $E_g = (336 \pm 32) \text{ см}^{-1}$.

Соотношение между волновым числом и энергией определяется из формулы Планка $E = \frac{hc}{\lambda}$, что даёт связь $1 \text{ см}^{-1} = 1,24 \cdot 10^{-4}$ эВ. В переводе на эВ получаем энергию $E_g = (0,042 \pm 0,004) \text{ эВ}$, что также хорошо коррелирует с нашими результатами.

Меньшее по сравнению с ТСТД число максимумов на температурной зависимости $\lg \delta$ на рисунке 7 связано с тем, что перед измерением образцы освобождались от адсорбированной влаги во избежание наложения на спектр $\lg \delta$ больших потерь на электропроводность. Здесь $T_{пр}$ – температура прокаливания образцов. Образцы исследованных кристаллов прокаливались в вакууме ($10^{-2} \dots 10^{-3}$) мм. рт. ст. в течение 8 часов.

Полученные значения проникаемости барьеров являются вполне реальной величиной, если учесть достаточно большую концентрацию протонсодержащих дефектов H₃O⁺, OH⁻, молекул воды H₂O и самих протонов, которая составляет величину порядка ($10^{18} \dots 10^{21}$) м⁻³, (см. таблицу 1).

Для максимумов № 2 спектров ТСТД, обусловленных релаксацией дефектов H₃O⁺, в

исследованных материалах высота барьера составляет величину (0,11...0,15) эВ, поэтому коэффициент прозрачности барьера в соответствии с (16) получается равным (10^{-5} ... 10^{-6}), что и следовало ожидать. То есть туннелирование дефектов H_3O^+ маловероятно.

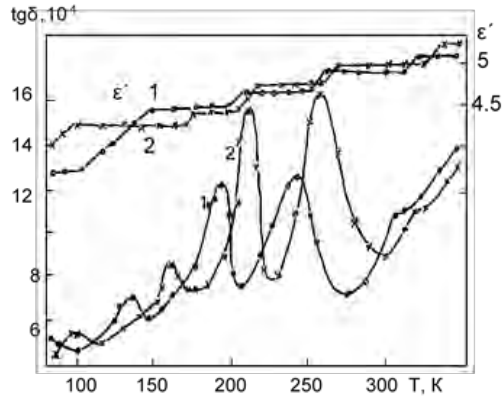


Рис. 7. Температурный спектр $tg\delta$ и ϵ' гидросиликата магния для $T_{пр} = 1323$ К: 1 – $\nu = 7$ МГц; 2 – $\nu = 12$ МГц

$$\frac{I_p}{I_e} = \frac{\exp\left(-2d\sqrt{\frac{2m_p(U_0-E_a)}{\hbar^2}}\right)}{\exp\left(-2d\sqrt{\frac{2m_e(U_0-E_a)}{\hbar^2}}\right)} = \exp\left[-2d\sqrt{\frac{2(U_0-E)}{\hbar^2}}(\sqrt{m_p} - \sqrt{m_e})\right] \quad (18)$$

$$\frac{I_p}{I_e} = \exp\left[-2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-10} \sqrt{\frac{2(0,07-0,057)1,6 \cdot 10^{-19}}{(1,055 \cdot 10^{-34})^2}}(\sqrt{1,67 \cdot 10^{-27}} - \sqrt{9,11 \cdot 10^{-31}})\right] \quad (19)$$

или $\frac{I_p}{I_e} = \exp(-5,84) = 0,00285$. Это значит, что туннельный ток, обусловленный протонами меньше туннельного тока, обусловленного электронами, при одинаковых условиях примерно в 350 раз, что и подтверждает эксперимент.

2. Результаты и их обсуждение

При решении уравнения Шрёдингера необходимо иметь в виду, что оно имеет физический смысл только при значениях энергии, которые соответствуют условиям, при которых ширина потенциального барьера имеет значение порядка длины волны де-Бройля. То есть, ширина барьера при $n = 2$ должна быть равна

$d = n \frac{\lambda}{2} = 0,12$ нм. Эта величина близко совпадает с расстоянием между ионами кислорода 0,121 нм в тетраэдре SiO_4^{4-} , между ионами кислорода 0,135 нм и молекулой воды в SiO_4^{4-} , а также между тетраэдрами 0,14 нм в силикатах. Наличие трансляционной диффузии протонов определяется так же по спектрам ЯМР протонов, что следует из [15], по которым видно присутствие двух типов различным образом закреплённых протонов в кристалле, выращенного в D_2O . В кристалле, выращенном в H_2O , пики накладываются и образуют один высокий максимум. Эти два протона могут участвовать в образовании двух дефектов – гидроксида OH^- и оксония H_3O^+ . Подвижность протонов можно определить из выражения

$$\mu = \frac{a^2 q v_0}{kT} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (20)$$

Совпадение температур и энергии активации спектров $tg\delta(\nu, T)$ со спектрами ТСТД подтверждает наличие указанных релаксаторов, что видно при сравнении таблиц 1 и 2. Энергия активации по спектру $tg\delta(\nu, T)$ рассчитывалась по формуле

$$U_a = \frac{kT_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (17)$$

Максимум №1 ТСТД для разных кристаллов возникает именно при $T = (86...100)$ К как видно из рисунков 4 и 5. При таких условиях сила тока не может иметь больших значений. Опыт подтвердил, что, действительно, плотность тока максимума №1 ТСТД имеет значение (10^{-9} ... 10^{-10}) А/м². С уверенностью можно предположить, что сила тока туннелирования прямо пропорциональна вероятности (1) нахождения частицы на определённом участке барьера. Тогда можно оценить соотношение между токами туннелирования, обусловленных протонами и электронами в виде (18) и (19).

Здесь $a \approx 0,2$ нм – расстояние между соседними позициями протона в структуре решётки, которое изменяется от 0,121 нм в тетраэдре SiO_4^{4-} до 0,219 нм в кристаллах иодата лития, $v_0 = 2 \cdot 10^{13} c^{-1}$ – частота перескоков протонов, E_a – энергия активации протонов по спектрам ЯМР [15], равная 0,054 эВ. Для $T = 300$ К получена подвижность ионов H_3O^+ в льде по Н. Маэно [16], где она равна $7,5 \cdot 10^{-7} m^2/V \cdot s$. В первом приближении барьер параболической формы можно аппроксимировать в виде

$$U(x) = \lambda_0(x^2 - d^2)^2 \quad (21)$$

где $\lambda_0 = \frac{m\omega^2}{8d^2}$ – параметр кристаллической решётки, d – ширина потенциального барьера. В этом случае для протона с более высокой энергией он оказывается ближе к узкой вершине барьера, что приводит к значительному увеличению его прозрачности. Следовательно, прямоугольный барьер даёт минимальное значение коэффициента прозрачности. Авторы [17] теоретически получили формулу для температуры, при которой начинается туннелирование, как верхней границы преобладания туннельных переходов над аррениусовскими.

$$T_{\text{тун}} = \left(\frac{\sqrt{2}\hbar}{\pi k_B d}\right) \sqrt{\frac{U}{m}} \quad (22)$$

Здесь k_B – постоянная Больцмана.

Применение формулы (22) для максимумов ТСТД дало удивительно хорошую корреляцию этих температур с экспериментальными для протонов и протонных дефектов. Например, при d порядка 0,1 нм

из этой формулы получается для максимума 1 гидросиликата магния $T_{\text{тун}} = 82,4$ К (в спектре ТСТД $T_{m1} = 86$ К, $U_a = 0,06$ эВ), для максимума 2 $T_{\text{тун}} = 118$ К ($T_{m2} = 112$ К, $U_a = 0,11$ эВ). Для иодата лития $T_{\text{тун}} = 90$ К (в спектре ТСТД $T_{m1} = 112$ К, $U_a = 0,07$ эВ), для максимума 2 $T_{\text{тун}} = 130$ К ($T_{m2} = 145$ К, $U_a = 0,15$ эВ), для максимума 3 $T_{\text{тун}} = 190,2$ К ($T_{m3} = 190$ К, $U_a = 0,32$ эВ).

В работе [19] предложен механизм диффузии протонов в суперпротонном проводнике гидросульфата цезия CsHSO_4 при температурах

фазового перехода 414 К, состоящий из двух стадий. На первой стадии протон смещается по направлению к одной из двух групп, участвующих в водородной связи. В результате формируется дефект HSO_4^- .

Вторая стадия заключается в разрыве более длинной водородной связи и повороте группы HSO_4^- в новое положение. Однако механизм поворота групп HSO_4^- не описан тем более, что исследования проводились только при высоких температурах.

Таблица 2

Энергия активации по спектру $\text{tg}\delta(\nu, T)$

№ макс.	Гидросиликат магния		Сульфат кальция	
	T_{max}, K	$U_a, \text{эВ}$	T_{max}, K	$U_a, \text{эВ}$
1	92	$0,022 \pm 0,005$	85	$0,020 \pm 0,005$
2	122	$0,05 \pm 0,01$	120	$0,05 \pm 0,01$
3	165	$0,09 \pm 0,02$	155	$0,10 \pm 0,02$
4	220	$0,18 \pm 0,03$	210	$0,21 \pm 0,03$
5	258	$0,38 \pm 0,04$	278	$0,44 \pm 0,04$
6	320	$0,45 \pm 0,05$	320	$0,54 \pm 0,06$

В работе [18] термостимулированная релаксация заряда в кристалле $\alpha - \text{LiIO}_3$ рассматривается только при температурах выше 150 К, связывая её с прыжками слабо закреплённых ионов Li^+ по вакансиям кристаллической решётки, что весьма маловероятно с энергетической точки зрения. Релаксация заряда при более низких температурах не рассматривается. Протон, лишенный электронной оболочки, не может существовать в свободном состоянии и может быть захвачен атомом кислорода в тетраэдрах SO_4^{2-} , (сульфаты), SiO_4^{4-} , (силикаты), октаэдрах IO_3^- (иодаты) и уменьшает его размеры с образованием группы OH^- ($r(\text{O}_2^-) = 0,14$ нм) и $r(\text{OH}^-) = 0,137$ нм) [20]. Таким образом, миграция протона происходит посредством прыжкового, туннельного или термически активированного процесса с разрывом связи О-Н. Протонная проводимость также обнаружена в мембранах Нафион-117, в которых наблюдается самодиффузия молекул воды [21].

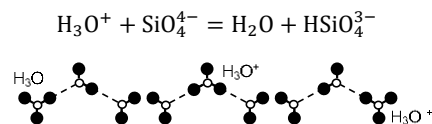
Стадия переориентации протонированных ионов HSO_4^- , HIO_3^- или HSiO_4^{3-} происходит легче и быстрее в результате перехода протона к иону кислорода соседней группы и имеет очень малую величину энергии активации, что позволяет осуществлять надбарьерный переход протонов с последующим образованием облака протонов около иона кислорода. В нашем случае энергия активации очень мала, порядка (0,05...0,07) эВ. Следовательно, миграционный механизм ионных дефектов OH^- или H_3O^+ через кристалл со слоистой кристаллографической структурой обусловлен наличием в структуре кристаллов слоёв из цепочек водородных связей, которые перемежаются слоями замкнутых тетраэдров SiO_4^{4-} , SO_4^{2-} или октаэдров IO_3^- . Их структура и динамика находятся в тесной связи с протонной проводимостью, соответствующей проводимости n-типа (ионы OH^-) и p-типа (ионы H_3O^+), описанной в патенте [24].

Проведённые расчёты и анализ спектров ТСТД, $\text{tg}\delta(\nu, T)$, ТСЛ, ИК и ЯМР спектров изученных кристаллов позволяют предложить следующий механизм туннелирования и трансляционной

диффузии протонов вдоль оси $Z(\text{C}_6)$ в направлении электрического поля в материалах с водородными связями.

1 этап – тепловые флуктуации. Протон, расположенный между молекулами воды, за счет тепловых флуктуаций и энергии электрического поля может преодолеть потенциальный барьер и сместиться вдоль водородной связи к соседней молекуле воды. В итоге образуется ионный дефект H_3O^+ : $\text{H}_2\text{O} + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+$, перемещение которого показано на рисунке 8. При введении протондонорных примесей типа $\text{HCl} + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{Cl}^- + \text{H}_3\text{O}^+$ концентрация этих дефектов увеличивается.

2 этап – явление туннелирования. Анионы Si^{4+} образуют спаренные слои, расположенные параллельно плоскостям (010). Молекулы H_2O располагаются между двойными плоскостями, а ионы кислорода, расположенные в вершинах тетраэдров SiO_4^{4-} (силикаты), SO_4^{2-} (сульфаты), или октаэдров IO_3^- (иодаты), имеют обобщённые электронные оболочки. В процессе появления обобщённого облака электронов высота потенциального барьера между ионами кислорода в молекулах воды и в структуре тетраэдров или октаэдров уменьшается. При такой конфигурации ионов в решётке вероятен не только надбарьерный, но и туннельный переходы протона от иона H_3O^+ из слоя воды к ближайшим анионам SO_4^{2-} в сульфатах, SiO_4^{4-} в силикатах или IO_3^- в иодатах (рис.9), происходящими по схеме

Рис. 8. Образование и миграция иона H_3O^+ в слое воды кристаллов с водородными связями

3 этап – процесс переориентации. Амплитуда колебаний ионов кислорода в процессе колебаний может достигать (0,02...0,05) нм при частоте колебаний 10^{13} c^{-1} , в результате чего облегчается

туннельный переход протона между ионами кислорода по схеме $\text{HSiO}_4^{3-} \rightarrow \text{SiO}_4\text{H}^{3-}$.

Связь иона кислорода со свободным протоном как указывалось более слабая, чем в ионе гидроксила OH^- , а так как кислород связан с кристаллической решеткой прочнее, чем водород, то последний мигрирует через кристалл в виде отдельного протона, а не иона OH^- и тем более не иона H_3O^+ . Переориентация ионов SO_4^{2-} или HSiO_4^{3-} маловероятна, а при низких температурах практически невозможна. С большей вероятностью происходит процесс переориентации протонированного аниона в результате перемещения протона между ионами кислорода внутри тетраэдра или октаэдра.

4 этап – явление туннелирования. После переориентации протонированных анионов HSiO_4^{3-} или HIO_3^- увеличивается вероятность перехода протона к соседним слоям тетраэдров SiO_4^{4-} или октаэдров IO_3^- . При этом процесс его перехода вдоль водородной связи является безактивационным и обусловлен туннельным переходом с частотой 10^{13} c^{-1} .

При такой ориентации ионов, возникают благоприятные условия для перехода протона через потенциальный барьер к соседнему иону кислорода внутри и между тетраэдрами. Частота переходов зависит от величины предэкспоненциального множителя (частоты валентных колебаний связи O–H) и его энергии активации, при этом новый протонированный анион может изменить свою ориентацию по схеме: $\text{SiO}_4\text{H}^{3-} \rightarrow \text{HSiO}_4^{3-}$.

5 этап – процесс переориентации. Далее происходит изменение ориентации протонированного аниона в следующем слое кристаллической решетки внутри тетраэдра по схеме $\text{HSiO}_4^{3-} \rightarrow \text{SiO}_4\text{H}^{3-}$, что показано на рисунке 9 в результате перехода протона туннельным способом к соседнему иону кислорода.

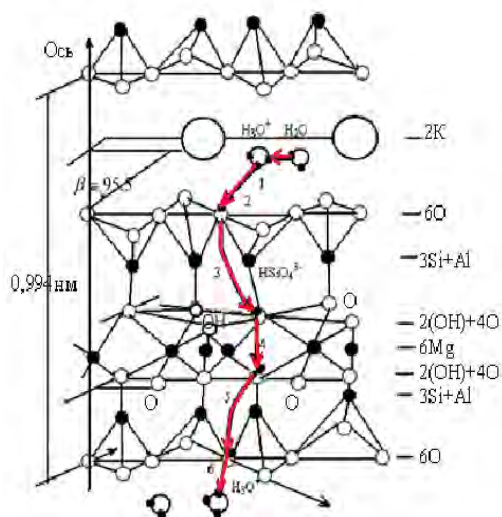
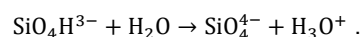


Рис. 9. Направленное перемещение иона H_3O^+ в результате трансляционной диффузии протона в электрическом поле в кристаллах флогопита. Стрелками и цифрами показаны этапы перемещения протона

6 этап – трансляционная диффузия. И, наконец, протон переходит в очередной слой

молекул воды с образованием дефекта H_3O^+ по схеме:



Описанный процесс будет периодически повторяться, в результате чего будет осуществляться трансляционная диффузия протонов между слоями кристаллической решетки. Полученная картина обуславливает ориентационный беспорядок анионов, когда протон будет иметь возможность перескочить к соседнему аниону только при наличии определённой ориентации обоих анионов.

Заключение

Короткие линейные H-связи являются очень слабыми связями с неглубоким потенциальным минимумом для протона. При низких температурах энергия, полученная протоном, оказывается достаточной для преодоления невысокого потенциального барьера, после чего протон становится свободным и способен занять свободное место на валентной связи аналогичного вида. Под действием приложенного электрического поля свободные протоны способны перемещаться по системе H-связей, поддерживая протонно-ионную проводимость в кристалле. Полученное выражение (17) позволило получить значение коэффициента прозрачности от $D = 0,0075$ для ширины барьера 0,12 нм, до $D = 0,00042$ для ширины барьера 0,15 нм, что составляет от 0,75% до 0,042%. Эта величина достаточно заметная, если учитывать концентрацию протонных дефектов порядка 10^{22} м^{-3} .

Энергия активации низкотемпературного максимума ТСТД (0,05...0,07) эВ хорошо коррелирует с энергией активации протонов 0,042 эВ, полученной в [14], и 0,054 эВ, полученной из ЯМР-спектров [15].

Полученные результаты подтверждаются исследованием инфракрасных спектров излучения, где были обнаружены линии с энергией 0,068 эВ (у иодата лития линия с волновым числом 550 см^{-1}) и у слюд мусковита и флогопита 0,066 эВ (линия с волновым числом 530 см^{-1}), обусловленные колебаниями протонов [12]. В работе [13] мы показали, что в результате трансляционной диффузии протонов образуются молекулы полутяжёлой воды HDO. Кроме того, низкое значение энергии активации подтверждает рассмотренный механизм туннелирования и трансляционной диффузии протонов в изученных кристаллических материалах.

Таким образом, как электропроводность, так и диффузия при низких температурах осуществляются протонным переносом между ионами кислорода в тетраэдрах анионов SO_4^{2-} , SiO_4^{4-} или октаэдрах IO_3^- , что согласуется с выводами работы [21] для протоннообменных мембран. Проведённое исследование слюд представляет весьма перспективным для создания новых электроизоляционных материалов, протонных проводников и протонных мембран, а иодат лития перспективен для широкого применения в оптоэлектронике и лазерной технике. Такие лазерные кристаллы используются для лидарного мониторинга молекул оксида азота и серы в выбросах на судах морских электростанций [22, 23].

Литература

1. Евдокимов С.В., Яценко А.В. Особенности темновой проводимости кристаллов ниобата лития конгруэнтного состава. Физика твёрдого тела, 2006, Т. 48 (2), С. 317-320.
2. Silambarasan A., Rajesh P., Ramasamy P., Karnal A.K., Bhatt R., Bhaumik I., Gupta P.K. Investigation of the bulk growth of α -LiIO₃ single crystals and the influence of pH on its structural, morphological and optical characteristics. *Bullet. Mater. Science*, 2017, Vol.40 (4), pp. 783–789.
3. Mogg L., Hao G.-P., Geim A.K., etc. Atomically thin micas as proton-conducting membranes. *Nature Nanotechnology*, 2019, Vol.14, p. 962.
4. Ryzhkin M.I., Ryzhkin I.A., Kashin A.M., etc. Proton Conductivity of Water in Mesoporous Materials. *JETP Letters*, 2018, Vol.108(9), pp. 627-632.
5. Rubakha V.I., Puchkov A.V. Rapid growth of α -LiIO₃ crystal. *Crystallography Reports*, 2014, Vol. 59, p. 768-771.
6. Timokhin V.M. Studying Breakdown and Electrical Hardening of Crystal Materials with Proton Conductivity. *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2022, Vol. 909, pp. 3-12 doi:10.4028/p-en1raa.
7. Шпольский Э.В. Атомная физика. Изд-во «Наука», 1974, Т. 1. с. 493.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Изд-во «Наука», 1972, Т.2. 272 с.
9. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс Р. Фейнмановские лекции по физике. Квантовая механика. Изд-во Мир, 1978, Т. 8, 9. 436 с.
10. Кузовников М.А. Сборник трудов «Физика экстремальных состояний вещества – 2007». ИФТТ РАН, Черноголовка, 2007, с. 40.
11. Kolesnikov A. I., Podlesnyak A., Sadykov R. A., etc. Pressure effect on hydrogen tunneling and vibrational spectrum in α -Mn. *Physical Review*, 2016, Vol. 94, 134301.
12. Timokhin V.M., Garmash V.M., Tedzhetov V.A. Infrared spectroscopy and tunneling of protons in crystals with hydrogen bonds. *Optics and Spectroscopy*, 2017, Vol. 122 (6), pp. 889–895. doi: 10.1134/S0030400X17060224
13. Timokhin V.M., Garmash V.M., Tedzhetov V.A. Study of IR Spectroscopy of Crystalline Materials Structure Used in Laser Shutters. *Key Engineering Materials*, 2022, Vol. 909. pp. 162-168. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. doi:10.4028/p-1i4y1k.
14. Fillaux F., Cousson A., Gutmann M. The macroscopic quantum behavior of protons in the KHCO₃ crystal: Theory and experiments. Windsor, United Kingdom, HAL science ouverte, 2007, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00369687>.
15. Timokhin V.M., Garmash V.M., Tarasov V.P. NMR spectra and translational diffusion of protons in crystals with hydrogen bonds. *Physics of the Solid State*, 2015, Vol. 57 (7), pp. 1314-1317.
16. Маэно Н. Наука о льде. Мир, Москва, 1988. 230 с.
17. Гольданский В.И., Трахтенберг Л.И. Флёрер В.И. Туннельные явления в химической физике. Изд-во «Наука», Москва, 1986.
18. Сорокин Н.И., Шалдин Ю.В. Термостимулированная релаксация заряда в суперионном проводнике α -LiIO₃. *Физика твердого тела*, 2017, Vol.59 (9), с. 1691-1694.
19. Белушкин А.В. Новые подходы к анализу структуры кристаллов: нестандартный метод в изучении механизмов диффузии атомов и молекул. *Успехи физических наук*, 2003, Vol.173(11), p. 1258-1262.
20. Hibino T., Mizutani H., Yajima T. Protonic Conduction in Oxides at Elevated Temperatures and Their Possible Applications. *Solid State Ionics*, 2000, Vol.68 (3), pp.154-161.
21. Galitskaya E., Privalov A. F., Weigler M. Исследование протонного транспорта в наноструктурированных перфторированных сульфополимерах. *Journal of Membrane Science*, 2020, Vol. 596 (15), 117691.
22. Turkin V.A., Cherbachi Y.V., Shemanin V.G., Dzhioev R.I., Lidar monitoring of nitrogen and sulphur oxides molecules in ship power installation emissions. Computer simulation, *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2021, Vol. 1, p. 672. 012005.
23. Turkin V.A., Sarychev I.A., Ignatenko A.V., Aleksandrova V.V. Monitoring pollution from ship power plants with laser technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, Vol.1, p. 867. 012177.
24. Тимохин В.М. Патент РФ Способ получения n и p типов протонных полупроводников. № 2649649. Оpubл. 04.04.2018. Бюл. № 10.

References

1. Yevdokimov S.V., Yatsenko A.V. Osobennosti temnovoy provodimosti kristallov niobata litiya kongruentnogo sostava [Peculiarities of the dark conductivity of lithium niobate crystals of congruent composition]. *Fizika tvyordogo tela*, 2006, T. 48 (2), ss. 317-320.
2. Silambarasan A., Rajesh P., Ramasamy P., Karnal A.K., Bhatt R., Bhaumik I., Gupta P.K. Investigation of the bulk growth of α -LiIO₃ single crystals and the influence of pH on its structural, morphological and optical characteristics. *Bullet. Mater. Science*, 2017, Vol.40 (4), pp. 783–789.
3. Mogg L., Hao G.-P., Geim A.K., etc. Atomically thin micas as proton-conducting membranes. *Nature Nanotechnology*, 2019, Vol.14, p. 962.
4. Ryzhkin M.I., Ryzhkin I.A., Kashin A.M., etc. Proton Conductivity of Water in Mesoporous Materials. *JETP Letters*, 2018, Vol.108(9), p. 627-632.
5. Rubakha V.I., Puchkov A.V. Rapid growth of α -LiIO₃ crystal. *Crystallography Reports*, 2014, Vol. 59, p. 768-771.
6. Timokhin V.M. Studying Breakdown and Electrical Hardening of Crystal Materials with Proton Conductivity. *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2022, Vol. 909, p. 3-12 doi:10.4028/p-en1raa.
7. Shpol'skiy E.V. Atomnaya fizika [Atomic Physics]. Izd-vo «Nauka». 1974. T. 1. S. 493.
8. Landau L.D., Lifshits E.M. Kvantovaya mekhanika [Quantum Mechanics]. Izd-vo «Nauka». 1972. T.2. 272 s.

9. Feynman R., Leyton R., Sands R. Feynmanovskiye lektsii po fizike. Kvantovaya mekhanika [Lectures in Physics. Quantum Mechanics]. Izd-vo Mir. 1978. T. 8, 9. 436 s.
10. Kuzovnikov M.A. Sbornik trudov «Fizika ekstremal'nykh sostoyaniy veshchestva [Proceedings of "Physics of Extreme State of Matter"]. 2007, IFTT RAN, Chernogolovka 2007. S. 40.
11. Kolesnikov A. I., Podlesnyak A., Sadykov R. A., etc. Pressure effect on hydrogen tunneling and vibrational spectrum in α -Mn. Physical Review. 2016. Vol. 94. 134301.
12. Timokhin V.M., Garmash V.M., Tedzhetov V.A. Infrared spectroscopy and tunneling of protons in crystals with hydrogen bonds, Optics and Spectroscopy. 2017. Vol. 122 (6). P. 889–895. doi: 10.1134/S0030400X17060224
13. Timokhin V.M., Garmash V.M., Tedzhetov V.A. Study of IR Spectroscopy of Crystalline Materials Structure Used in Laser Shutters, Key Engineering Materials. 2022. Vol. 909. P. 162-168. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. doi:10.4028/p-1i4y1k.
14. Fillaux F., Cousson A., Gutmann M. The macroscopic quantum behavior of protons in the KHCO₃ crystal: Theory and experiments, Windsor, United Kingdom, HAL science ouverte (2007) <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00369687>.
15. Timokhin V.M., Garmash V.M., Tarasov V.P. NMR spectra and translational diffusion of protons in crystals with hydrogen bonds, Physics of the Solid State. 2015. Vol. 57 (7). pp. 1314-1317.
16. Maeno N. Nauka o l'de [Science of Ice]. Mir, Moskva, 1988. 230 s.
17. Gol'danskiy V.I., Trakhtenberg L.I. Flërov V.I. Tunnel'nyye yavleniya v khimicheskoy fizike [Tunnel phenomena in chemical physics]. Izd-vo «Nauka», Moskva, 1986.
18. Sorokin N.I., Shaldin YU.V. Termostimulirovannaya relaksatsiya zaryada v superionnom provodnike α -LiIO₃ [Thermal stimulated charge relaxation in superionic conductor α -LiIO₃]. Fizika tverdogo tela, 2017, Vol.59 (9), ss. 1691-1694.
19. Belushkin A.V. Novyye podkhody k analizu struktury kristallov: nestandartnyy metod v izuchenii mekhanizmov diffuzii atomov i molekul [New Approaches to Crystal Structure Analysis: An Unconventional Method in the Study of Diffusion Mechanisms of Atoms and Molecules]. Uspekhi fizicheskikh nauk. 2003, Vol.173(11), ss. 1258-1262.
20. Hibino T., Mizutani H., Yajima T. Protonic Conduction in Oxides at Elevated Temperatures and Their Possible Applications. Solid State Ionics, 2000, Vol. 68 (3), pp.154-161.
21. Galitskaya E., Privalov A. F., Weigler M. Исследование протонного транспорта в наноструктурированных перфторированных сульфополимерах. Journal of Membrane Science, 2020, Vol. 596 (15). 117691.
22. Turkin V.A., Cherbachiy Y.V., Shemanin V.G., Dzhiyev R.I., Lidar monitoring of nitrogen and sulphur oxides molecules in ship power installation emissions, Computer simulation, IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2021, Vol.1, p. 672. 012005.
23. Turkin V.A., Sarychev I.A., Ignatenko A.V., Aleksandrova V.V. Monitoring pollution from ship power plants with laser technologies. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, Vol.1, pp. 867. 012177.
24. Timokhin V.M. Patent RF Sposob polucheniya n i p tipov protonnykh poluprovodnikov [Method for producing n and p types of proton semiconductors]. № 2649649. Opubl. 04.04.2018. Byul. № 10.

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

Тимохин Виктор Михайлович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Высшей математики и физики, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: t.v.m@inbox.ru.

Viktor M. Timokhin, Ph.D. (Phys & Math), Assistant professor at the Higher Mathematics and Physics Department, Admiral Ushakov Maritime State University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk, 353918. Russian Federation, E-mail: t.v.m@inbox.ru.

Теджетов Валентин Алексеевич, ведущий инженер программист, аспирант кафедры Материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, пр. Ленина, 4, e-mail: Velmurad@yandex.ru

Valentin A. Tedzhetov, Leading engineer programmer, graduate student of the Department «Materials science of semiconductors and dielectrics» of National University of Science and Technology «MISIS», Lenin avenue, 4, Moscow, Russian Federation, E-mail: Velmurad@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 29.01.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 30.01.2024.

Научная статья

УДК 629.5.02; 614.842.6; 629.331

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.032>

О способе моделирования пожаровзрывоопасных ситуаций на паромках и плавучих автостоянках с использованием цепей Маркова

Таранцев А.А.¹ t_54@mail.ru, Маринов М.Л.¹ marinlomsky@gmail.com, Коновалов И.Н.¹ info@ipttran.ru¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН

Аннотация. В статье рассмотрена проблема моделирования пожаровзрывобезопасности многопалубных паромов и паромов с открытыми палубами, перевозящих автомобили на жидком топливе и газобаллонные автомобили при наличии пассажиров и без них, а также плавучих автостоянок с такими автомобилями. Показано, что пожары и взрывы автомобилей на паромках в плавании могут привести к трагическим последствиям ввиду низкой огнестойкости корпуса судна и невозможности оказания оперативной помощи. Подобные ситуации на плавучих автостоянках также опасны ввиду риска и для объектов на берегу. В этой связи рассмотрена возможность моделирования пожаровзрывоопасных ситуаций с использованием цепей Маркова как с дискретным, так и с непрерывным временем. Получены количественные оценки вероятностей состояний паромки (плавучей автостоянки) и сделаны выводы о целесообразности дальнейших исследований в части моделирования пожаровзрывобезопасных ситуаций и совершенствования соответствующих нормативных документов.

Ключевые слова: Автомобили, паромы, плавучие автостоянки, пожаровзрывобезопасность, моделирование, цепи Маркова

Финансирование: работа выполнена в рамках исполнения государственного задания ИПТ РАН № 075-00602-24-0 на 2024 год и на плановый период 2025 и 2026 годов за счет средств предоставленной Минобрнауки России субсидии (соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 18.01.2024 №075-03-2024-666)

Для цитирования: Таранцев А.А., Маринов М.Л., Коновалов И.Н. О способе моделирования пожаровзрывоопасных ситуаций на паромках и плавучих автостоянках с использованием цепей Маркова // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 270—275. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.032

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.032>

On the method of modeling fire and explosive situations on ferries and floating parking lots using Markov chains

Alexander A. Tarantsev¹ t_54@mail.ru, Marin L. Marinov¹ marinlomsky@gmail.com,Ivan N. Konovalov¹ simulator.ipt@outlook.com¹Solomenko Institute of Transport Problems of RAS

Abstract. The article considers the problem of modeling fire and explosion safety of multi-deck ferries and open-deck ferries carrying liquid fuel cars and gas-cylinder cars with and without passengers, as well as floating parking lots with such cars. It is shown that fires and explosions of cars on ferries during navigation can lead to tragic consequences due to the low fire resistance of the vessel's hull and the inability to provide operational assistance. Similar situations in floating parking lots are also dangerous due to the risk to facilities on shore. In this regard, the possibility of modeling fire and explosive situations using Markov chains with both discrete and continuous time is considered. Quantitative estimates of the probabilities of the ferry (floating parking lot) conditions have been obtained and conclusions have been drawn about the expediency of further research in terms of modeling fire and explosion-proof situations and improving relevant regulatory documents.

Key words. Cars, ferries, floating parking lots, fire and explosion safety, modeling, Markov chains

Financial Support: the work was carried out as part of the execution of the state task of the IPT RAS № 075-00602-24-0 for 2024 and for the planned period of 2025 and 2026 at the expense of the 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 18 January 2024 № 075-03-2024-666)

For citation: Alexander A. Tarantsev, Marin L. Marinov, Ivan N. Konovalov. On the method of modeling fire and explosive situations on ferries and floating parking lots using Markov chains. 2024. № 1 part 1, P. 270—275. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.032

Введение

Современный этап развития общества характеризуется появлением всё большего количества автомобилей как в абсолютном исчислении, так и на душу населения.

Например, по данным аналитического агентства «АВТОСТАТ» [1] в нашей стране парк легковых автомобилей достигает в Москве 3,7 млн., а их количество на 1000 жителей (показатель N_t) ≈ 290 , в Санкт-Петербурге соответственно $\approx 1,8$ млн. и $N_t \approx 320$. Причём динамика этих показателей в целом по РФ имеет тенденцию к росту. Для справки: в мире

в первой тройке по этому показателю Сан-Марино ($N_T=1263$), Монако ($N_T=899$) и США ($N_T=799$).

Урбанизации и высокая стоимость земли в городах порождает проблему парковок для автомобилей [2], которая решается как путём оборудования много- и одноуровневых наземных и подземных автостоянок, так и плавучих автостоянок [3] (рис.1).



а



б

Рис.1. Плавучие автостоянки – одноуровневые (а) и многоуровневые (б). Здесь и далее фото из открытых источников в интернете

Кроме того, большое количество автомобилей предполагает и высокую интенсивность их перевозок на пароме как на открытых (рис.2-а), так и на закрытых палубах (рис.2-б).

Ещё одной мировой тенденцией является появление всё большего числа автомобилей на альтернативных видах топлива – газобаллонных (ГБА) автомобилей и электромобилей.

Проблема пожаровзрывоопасности

Однако вышеописанные тенденции имеют и обратную сторону, связанную с одной стороны с пожаровзрывоопасностью автомобилей [4] (рис.3), а с другой – со слабой устойчивостью металлических корпусов паромов и плавучих автостоянок к высокотемпературному воздействию пожара (рис.4) и, тем более, к воздействию ударных волн при взрыве ГБА [5].



а



б

Рис.2. Паромы для перевозки автомобилей: с открытой палубой (а) и многопалубный (б).



а



б



в



г

Рис.3. Горение автомобиля на жидком топливе (а), взрывы (б) и пожары (в) ГБА, взрывное горение электромобиля (г)



а



б

Рис.4. Пожар на автомобильном пароме (а) и его последствия (б)

К настоящему времени скопилась достаточно большая статистика [6-16] в части пожаров и взрывов на пароме, перевозящих автомобили, а также людей – водителей и пассажиров. Причины этих инцидентов самые различные – от пресловутого «человеческого фактора» до возгораний электромобилей до взрывов бензобаков и баллонов.

Особую опасность представляют пожары на многопалубных морских и океанских автомобильных пароме, когда помощь извне и спасательные работы могут начаться с запозданием, а штормовая погода может привести к гибели судна, как это случилось с *Felicity Ace* в феврале 2022 г. [5]. Не менее опасные ситуации могут возникать и на плавучих автостоянках (рис.1).

Моделирования пожаровзрывоопасных ситуаций с использованием цепей Маркова

К настоящему времени в публикациях [3-5, 17, 18] достаточно подробно раскрыты вопросы, связанные с пожарами и взрывами в закрытых объёмах (в т.ч. на

паромах и плавучих автостоянках) и с учётом каскадного развития ЧС [18, 19], предложены также эффективные способы взрывопожарной защиты [20].

Тем не менее, представляется целесообразным смоделировать пожаровзрывоопасную ситуацию с учётом математического аппарата цепей А.А.Маркова (1856-1922) [21, 22]. Для этого в первом приближении можно использовать граф с тремя состояниями (рис.5): S_1 – нормальное функционирование паромы (плавучей автостоянки), S_2 – возгорание автомобиля, S_3 – взрыв ГБА.

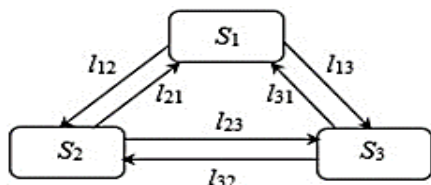


Рис.5. Граф переходов для моделирования пожаровзрывоопасной ситуации на пароме (плавучей автостоянке)

Очевидно, на пароме (плавучей автостоянке) при возгорании автомобиля происходит переход из состояния S_1 в состояние S_2 , а при взрыве ГБА – из состояния S_1 в состояние S_3 . Пожар автомобиля может спровоцировать взрыв ГБА (переход $S_2 \rightarrow S_3$), а взрыв ГБА может привести к разрушению и пожару соседнего автомобиля (переход $S_3 \rightarrow S_2$). Также при незначительном возгорании автомобиля и оперативном его тушении будет осуществляться переход $S_2 \rightarrow S_1$, а если взрыв газа будет слабым (хлопок), то возможен переход $S_3 \rightarrow S_1$. Переходам ставятся в соответствие «веса» $\{l_{ij}\}$, которые могут быть заданы либо в виде вероятностей переходов $\{p_{ij}\}$, либо в виде интенсивностей $\{\lambda_{ij}\}$, имеющих размерность, обратную времени.

При этом задача сводится к определению вероятностей $P_1 + P_3$, соответствующих состояниям $S_1 + S_3$ при известных начальных вероятностях $P_1^0 + P_3^0$. Для определения вероятностей состояний $P_1 + P_3$, если заданы вероятности переходов $\{p_{ij}\}$, составляется матрица переходов:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

В матрице P суммы вероятностей $\{p_{ij}\}$ по строкам равны 1, а диагональные элементы $p_{ii} = 1 - p_i^x$, где p_i^x – сумма вероятностей в i -й строке за исключением диагонального элемента. В соответствии с итерационным алгоритмом [22] вероятности $\{P\}$ рассчитываются пошагово: $\{P^0\} \rightarrow \{P^1\} \rightarrow \{P^2\} \rightarrow \dots \rightarrow \{P^k\} \rightarrow \dots \rightarrow \{P^K\}$. В данном случае марковская цепь является однородной, поскольку матрица P неизменна на каждом k -ом шаге расчёта (K – число шагов, соответствующее стабилизации процесса). Такой подход соответствует марковским процессам с дискретным временем (хотя, строго говоря, время здесь в явном виде отсутствует).

В качестве примера, положив $p_{12}=0,02$; $p_{21}=0,05$; $p_{13}=0,01$; $p_{31}=0,005$; $p_{23}=0,2$; $p_{32}=0,4$ (эти вероятности приняты условно), матрицу P приведём к виду:

$$P = \begin{bmatrix} 0,97 & 0,02 & 0,01 \\ 0,05 & 0,75 & 0,20 \\ 0,005 & 0,40 & 0,595 \end{bmatrix}.$$

Положив, что в начальный момент $P_1^0=1$ (на пароме нет ЧС) и $P_2^0=P_3^0=0$, применив итерационный

алгоритм [22], находим динамику изменения вероятностей состояний на пароме – см. табл.1.

Таблица 1
Динамика вероятностей состояний

k	P_1	P_2	P_3	k	P_1	P_2	P_3
0	1.000	.0000	.0000	50	.5502	.2927	.1572
1	.9700	.0200	.0100	60	.5420	.2980	.1601
2	.9420	.0384	.0197	70	.5377	.3007	.1615
3	.9157	.0555	.0288	80	.5356	.3021	.1623
4	.8912	.0715	.0374	90	.5344	.3029	.1627
10	.7736	.1477	.0787	100	.5339	.3032	.1629
20	.6571	.2233	.1196	110	.5336	.3034	.1630
30	.5970	.2623	.1407	120	.5334	.3035	.1631
40	.5661	.2823	.1516	$K=130$	.5333	.3036	.1631

Как видно из табл.1, к 130-му шагу процесс стабилизируется, в ходе эксплуатации паромы на нём с вероятностью более 30% возможны пожары автомобилей, а с вероятностью более 16% взрывы баллонов. Хотя, как и было указано, вероятности переходов $\{p_{ij}\}$ приняты условно, вопросам пожаровзрывобезопасности паромов при перевозке автомобилей следует уделять особое внимание.

Тем не менее, применение марковских цепей с дискретным временем не лишено недостатков, таких как сложность определения вероятностей переходов $\{p_{ij}\}$ и трудоёмкость вычислений.

В этой связи выдающийся советский математик А.Н.Колмогоров (1903-1987) в начале 30-х годов XX века показал возможность перехода к марковским процессам с непрерывным временем. При этом с учётом ряда допущений [21, 22] матрица P заменялась системой обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, в которой уже использовались интенсивности переходов $\{\lambda_{ij}\}$. Применительно к графу переходов на рис.5 такая система дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{13})P_1 + \lambda_{21}P_2 + \mu_{31}P_3, \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_{12}P_1 - (\lambda_{21} + \lambda_{23})P_2 + \lambda_{32}P_3, \\ \frac{dP_3}{dt} = \lambda_{13}P_1 + \lambda_{23}P_2 - (\lambda_{31} + \lambda_{32})P_3 \end{cases} \quad (2)$$

(очевидно: $P_1 + P_2 + P_3 = 1$). Решение системы дифференциальных уравнений (2) при $P_1^0=1$, $P_2^0=P_3^0=0$ получено в явном виде:

$$\begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_3 \\ C_5 \end{bmatrix} \exp(k_1 t) + \begin{bmatrix} C_2 \\ C_4 \\ C_6 \end{bmatrix} \exp(k_2 t) + \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} (A_1 + A_2 + A_3)^{-1}, \quad (3)$$

$$\text{где } \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = -0,5 \left(\Lambda_0 \mp \sqrt{\Lambda_0^2 - 4(A_1 + A_2 + A_3)} \right),$$

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \frac{\mp 1}{k_1 - k_2} \left(\frac{A_2 + A_3}{A_1 + A_2 + A_3} \begin{bmatrix} k_2 \\ k_1 \end{bmatrix} + \lambda_{12} + \lambda_{13} \right),$$

$$\Lambda_0 = \lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{31} + \lambda_{32},$$

$$\Lambda_1 = \lambda_{21}\lambda_{31} + \lambda_{31}\lambda_{23} + \lambda_{21}\lambda_{32},$$

$$\Lambda_2 = \lambda_{12}\lambda_{31} + \lambda_{12}\lambda_{32} + \lambda_{13}\lambda_{32},$$

$$\Lambda_3 = \lambda_{12}\lambda_{23} + \lambda_{13}\lambda_{21} + \lambda_{13}\lambda_{23},$$

$$\begin{bmatrix} C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda_{21} - \lambda_{31}} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \left(\lambda_0 + \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} \right), \quad \lambda_0 = \lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{31},$$

$$\begin{bmatrix} C_5 \\ C_6 \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda_{31} - \lambda_{21}} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \left(\mu_0 + \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} \right), \quad \mu_0 = \lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{21}.$$

В качестве примера, положив $\lambda_{12}=0,02$; $\lambda_{21}=0,05$; $\lambda_{13}=0,01$; $\lambda_{31}=0,005$; $\lambda_{23}=0,2$; $\lambda_{32}=0,4$ (интенсивности

приняты условно и могут иметь размерность сут⁻¹), преобразуем выражение (3) к виду:

$$\begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4667 \\ -0.3027 \\ -0.1640 \end{bmatrix} e^{-0.6419t} + \begin{bmatrix} 7.029 \cdot 10^{-5} \\ -0.915 \cdot 10^{-3} \\ 8.447 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix} e^{-0.6208t} + \begin{bmatrix} 0.53325 \\ 0.30364 \\ 0.16311 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Расчёты динамики вероятностей по выражению (4) приведены в табл.2. Нетрудно видеть, что результаты оценок вероятностей состояний паромов (плавучей автостоянки), полученных по марковским моделям с дискретным и непрерывным временем, хорошо согласуются между собой, что подтверждает их адекватность.

Таблица 2
Расчётная оценка по (4) динамики вероятностей состояний

t	P ₁	P ₂	P ₃	t	P ₁	P ₂	P ₃
0	1.0000	.00000	.00000	2	.94372	.03712	.01915
.01	.99970	.00020	.00010	5	.87181	.08398	.04421
.02	.99940	.00040	.00020	10	.77886	.14432	.07683
.05	.99850	.00100	.00050	20	.66251	.21979	.11770
.10	.99701	.00199	.00100	50	.55209	.29142	.15649
.20	.99404	.00397	.00199	100	.53401	.30315	.16284
.50	.98524	.00981	.00495	∞	.53325	.30364	.16311
1.0	.97095	.01925	.00980				

Литература

1. Обеспеченность автомобилями в крупнейших городах России [Электронный ресурс]. URL: <https://www.autostat.ru/press-releases/46332/> (Дата обращения: 12.12.2023).
2. СП 113.13330.2023 Стоянки автомобилей. Актуализация СНиП 21-02-99*.
3. Таранцев А.А., Поташев Д.А., Куватов В.И. Пожаровзрывобезопасность автомобильных палуб (стоянок) на паромов // Морские интеллектуальные технологии, №1, т.1, 2022, с.12-17.
4. Таранцев А.А., Поташев Д.А., Сытдыков М.Р. О пожароопасности некоторых типов автомобилей // Электронный журнал «Вестник СПбУ ГПС МЧС России», №1, 2021, с.1-8. DOI: 10.24412/2218-130X-2021—1-1-8.
5. Таранцев А.А., Поташев Д.А., Скороходов Д.А. Основы управления пожаровзрывобезопасностью паромных автоперевозок при наличии газобаллонных автомобилей // Морские интеллектуальные технологии, №4, т.1, 2022, с.279-283.
6. В Турции вспыхнул паром с автомобилями – есть пострадавшие [Электронный ресурс]. URL: <https://crimea.ria.ru/20230302/v-turtsii-vspykhnul-parom-s-avtomobilyami--est-postradavshie-1127293573.html?ysclid=lr5xbyhfc119214468> (Дата обращения: 12.12.2023).
7. Судно «Ангара» с 570 автомобилями на борту все еще горит в Японском море [Электронный ресурс]. URL: <https://news.drom.ru/88297.html?ysclid=lr61an9ak543360409> (Дата обращения: 12.12.2023).
8. Перевозившее 3783 автомобилей судно сгорело, но не затонуло. Его отбуксировали в порт [Электронный ресурс]. URL: https://auto.ru/mag/article/perevozhivshee-tysyachi-avtomobiley-sgorevshee-sudno-otbuktirovali-v-port/?utm_referrer=yandex.ru (Дата обращения: 12.12.2023).
9. В Швеции загорелся паром с сотнями людей на борту [Электронный ресурс]. URL: <https://lenta.ru/news/2022/08/29/trista/> (Дата обращения: 12.12.2023).
10. В Северном море пожар охватил паром с 3 000 автомобилей на борту: люди прыгали в воду [Электронный ресурс]. URL: <https://easaily.com/ru/news/2023/07/26/v-severnom-more-pozhar-ohvatil-parom-s-3-000-avtomobiley-na-bortu-lyudi-prygali-v-vodu> (Дата обращения: 12.12.2023).
11. Спасательную операцию проводят в Балтийском море после пожара на шведском пароме [Электронный ресурс]. URL: https://www.dp.ru/a/2022/08/29/Spasatelnuju_operaciju_pro?ysclid=lr69bvvp765325750 (Дата обращения: 12.12.2023).
12. Что известно о пожаре на пароме в Ионическом море [Электронный ресурс]. URL: <https://tass.ru/proisshiestviya/13752645?ysclid=lr6b5xz8q416711344> (Дата обращения: 12.12.2023).
13. Загорелось судно с 4500 новыми Chery, идущее из Южной Кореи [Электронный ресурс]. URL: <https://motor.ru/news/chery-ship-06-02-2023.htm?ysclid=lr6ckd2at939003945> (Дата обращения: 12.12.2023).
14. Пожар на автомобильной палубе паромов [Электронный ресурс]. URL: https://www.korabel.ru/news/comments/pozhar_na_avtomobilnoy_palube_paroma.html (Дата обращения: 12.12.2023).
15. Под Усинском загорелся паром [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bnkomi.ru/data/news/159615/> (Дата обращения: 12.12.2023).
16. Автомобильный паром с 300 людьми на борту горит у шведского побережья [Электронный ресурс]. URL: <https://smartpress.by/news/28257/> (Дата обращения: 12.12.2023).

Заключение

Таким образом, в статье рассмотрены вопросы моделирования пожаровзрывобезопасности паромов и плавучих автостоянок с использованием марковских цепей с дискретным и непрерывным временем.

На основании результатов компьютерного моделирования при наличии статистических данных о возгораниях и взрывах автомобилей могут быть сформулированы конкретные предложения по обеспечению их пожаровзрывобезопасности. Такие предложения могут быть включены в соответствующие нормативные документы [23, 24].

В дальнейшем планируется: а) рассмотреть особенности тушения пожаров, ликвидацию последствий взрывов и проведение аварийно-спасательных работ на паромов и плавучих автостоянках с учётом Боевого устава [25]; б) сформулировать соответствующие предложения для внесения дополнений в этот документ; в) провести моделирование опасных факторов пожара и взрыва на пришвартованных паромов и плавучих автостоянок.

17. Поташев Д.А. О проблеме взрывопожароопасности подземных автостоянок // Проблемы управления рисками в техносфере. №4 (60), 2021, с.132-139.
18. Таранцев А.А., Кожевин Д.Ф., Поташев Д.А. О каскадном развитии взрывопожарной ситуации на автостоянке // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. – 2023. – № 4. – С.16-25.
19. Таранцев А.А., Поташев Д.А., Матвеев А.В., Шкитронов М.Е. О моделировании каскадного развития ЧС при пожарах в подземных автостоянках // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2023. – №3 (67). – С. 131-140
20. Автостоянка закрытого типа с повышенной взрывопожарной безопасностью и способ использования данной автостоянки / А.А. Таранцев, Д.А. Поташев и др. // Патент RU 2803032 С1, зарегистрирован в госреестре изобретений РФ 05.09.2023.
21. Кемени Д., Снелл Д. Конечные цепи Маркова. М.: Наука, 1970. 271 с.
22. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972, 552 с.
23. Правила пожарной безопасности на морских судах. Постановление Минтранса РФ от 31.10.2003 № 10.
24. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 г. СОЛАС 74. Протокол 1988 г. (с изменениями).
25. Приказ МЧС России от 16.10.2017 г. № 444 "Об утверждении Боевого устава подразделений пожарной охраны, определяющего порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ.

References

1. Provision of cars in the largest cities of Russia [Electronic resource]. URL: <https://www.autostat.ru/press-releases/46332/> (Date of access: 12/12/2023).
2. SP 113.13330.2023 Car parking. Update of SNiP 21-02-99*.
3. Tarantsev A.A., Potashev D.A., Kuvatov V.I. Fire and explosion safety of car decks (parking lots) on ferries // Marine intelligent technologies, No. 1, vol. 1, 2022, pp. 12-17.
4. Tarantsev A.A., Potashev D.A., Sytdykov M.R. On the fire hazard of certain types of cars // Electronic journal "Bulletin of the SPbU State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia", No. 1, 2021, pp. 1-8. DOI: 10.24412/2218-130X-2021—1-1-8.
5. Tarantsev A.A., Potashev D.A., Skorokhodov D.A. Fundamentals of fire and explosion safety management of ferry road transport in the presence of gas-cylinder vehicles // Marine intelligent technologies, No. 4, vol. 1, 2022, pp. 279-283.
6. A ferry carrying cars caught fire in Turkey – there are casualties [Electronic resource]. URL: <https://crimea.ria.ru/20230302/v-turtsii-vspykhnul-parom-s-avtomobilyami--est-postradavshie-1127293573.html?ysclid=lr5xbvhfc119214468> (Date of access: 12.12.2023).
7. The Angara ship with 570 cars on board is still burning in the Sea of Japan [Electronic resource]. URL: <https://news.drom.ru/88297.html?ysclid=lr61an9ak543360409> (Access date: 12/12/2023).
8. The ship, which was carrying 3,783 cars, burned down but did not sink. It was towed to the port [Electronic resource]. URL: https://auto.ru/mag/article/perevozivshee-tysyachi-avtomobiley-sgorevshee-sudno-otbuksirovali-v-port/?utm_referrer=yandex.ru (Date of access: 12.12.2023).
9. In Sweden, a ferry with hundreds of people on board caught fire [Electronic resource]. URL: <https://lenta.ru/news/2022/08/29/trista/> (Access date: 12/12/2023).
10. In the North Sea, a fire engulfed a ferry with 3,000 cars on board: people jumped into the water [Electronic resource]. URL: <https://easaily.com/ru/news/2023/07/26/v-severnom-more-pozhar-ohvatil-parom-s-3-000-avtomobiley-na-bortu-lyudi-prygali-v-vodu> (Date of access: 12/12/2023).
11. A rescue operation is carried out in the Baltic Sea after a fire on a Swedish ferry [Electronic resource]. URL: https://www.dp.ru/a/2022/08/29/Spasatelnuju_operaciju_pro?ysclid=lr69bvpe765325750 (Access date: 12.12.2023).
12. What is known about the fire on the ferry in the Ionian Sea [Electronic resource]. URL: <https://tass.ru/proisshestiya/13752645?ysclid=lr6b5xz8q416711344> (Access date: 12/12/2023).
13. A ship with 4,500 new Cherys coming from South Korea caught fire [Electronic resource]. URL: <https://motor.ru/news/chery-ship-06-02-2023.htm?ysclid=lr6ckd2at939003945> (Date of access: 12.12.2023).
14. Fire on the car deck of the ferry [Electronic resource]. URL: https://www.korabel.ru/news/comments/pozhar_na_avtomobilnoy_palube_paroma.html (Access date: 12.12.2023).
15. A ferry caught fire near Usinsk [Electronic resource]. URL: <https://www.bnkomi.ru/data/news/159615/> (Access date: 12/12/2023).
16. A car ferry with 300 people on board burns off the Swedish coast [Electronic resource]. URL: <https://smartpress.by/news/28257/> (Access date: 12/12/2023).
17. Potashev D.A. On the problem of explosion and fire hazard in underground parking lots // Problems of risk management in the technosphere. No. 4 (60), 2021, pp. 132-139.
18. Tarantsev A.A., Kozhev D.F., Potashev D.A. On the cascade development of an explosion and fire situation in a parking lot // Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. – 2023. – No. 4. – P.16-25.
19. Tarantsev A.A., Potashev D.A., Matveev A.V., Shkitronov M.E. On modeling the cascade development of emergency situations during fires in underground parking lots // Problems of risk management in the technosphere. – 2023. – No. 3 (67). – pp. 131-140

20. Closed parking lot with increased explosion and fire safety and method of using this parking lot / A.A. Tarantsev, D.A. Potashev et al. // Patent RU 2803032 C1, registered in the State Register of Inventions of the Russian Federation on 09/05/2023.
21. Kemeny D., Snell D. Finite Markov chains. M.: Nauka, 1970. 271 p.
22. Ventzel E.S. Operations research. M.: Soviet radio, 1972, 552 p.
23. Fire safety rules on sea vessels. Resolution of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated October 31, 2003 No. 10.
24. International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974. SOLAS 74. Protocol, 1988 (as amended).
25. Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated October 16, 2017 No. 444 "On approval of the combat regulations of fire departments, which determines the procedure for organizing fire extinguishing and carrying out emergency rescue operations.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Таранцев Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук (199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13); e-mail: nfo@iptran.ru

Alexander A. Tarantsev, professor, Dr. Sci. (Eng), Head of the laboratory of Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science (13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation), e-mail: nfo@iptran.ru

Маринов Марин Любенов, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук (199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13); e-mail: marinlomsy@gmail.com

Marin L. Marinov, candidate of technical sciences, leading researcher of Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science (13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation), e-mail: marinlomsy@gmail.com

Коновалов Иван Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук (199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13); e-mail: info@iptran.ru

Ivan N. Kononov, candidate of technical sciences, senior researcher of Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science (13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation), e-mail: info@iptran.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 04.02.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 11.02.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 22.02.2024.

Научная статья

УДК 537.84

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.033>

О генерации электрического поля, вызванной круговым движением проводящей среды

Маламанов С.Ю.¹ stevmal@mail.ru, Павловский В.А.² v.a.pavlovsky@gmail.com¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Важнейшей энергией, используемой как в производстве, так и на транспорте, является механическая энергия (движение автомобилей, поездов, кораблей и т.п.). Электрическая энергия используется, в частности, во всевозможных способах связи, радиотехнике, автоматике и т.д. Внутренняя энергия используется непосредственно в химико-технологических процессах, металлургии и т.п. Механическую энергию трудно передавать от источника потребителю. Внутреннюю энергию сложно преобразовывать в другие виды энергии. В этой связи, неоспоримым преимуществом обладает электрическая энергия: её можно передавать на огромные расстояния, просто и удобно распределять между разными потребителями и наконец, с помощью достаточно простых устройств её легко превратить в другие виды энергии. Большим достоинством электрической энергии является то, что это единственный вид энергии, применяемый в радиотехнике (радиофизике), электронно-вычислительной технике, связи и автоматике.

Междисциплинарная направленность современных вычислительных комплексов позволяет ставить и решать задачи численного моделирования в различных областях науки и техники. В настоящей работе представлены результаты численного моделирования, направленные на изучение взаимодействия гидродинамического и магнитного полей. Максимальный эффект этого взаимодействия достигается, когда вектора скорости потока и индукции магнитного поля взаимно перпендикулярны. В работе рассмотрена одна из подобных ситуаций. Модельная постановка задачи позволяет лучше понять определённые аспекты этого взаимодействия. Проведенное численное моделирование показывает, что локальное вращательное движение проводящей жидкости, находящейся во внешнем однородном магнитном поле, индуцирует электрическое поле.

Ключевые слова: численное моделирование, проводящая жидкость, скорость потока, разность потенциалов, электрическое поле, математическая модель.

Для цитирования: Маламанов С.Ю., Павловский В.А. О генерации электрического поля, вызванной круговым движением проводящей среды. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 276—281. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.033

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.033>

On the generation of an electric field caused by the circular motion of a conducting medium

Stepan Y. Malamanov¹ stevmal@mail.ru, Valery A. Pavlovsky² v.a.pavlovsky@gmail.com¹ Baltic State Technical University "VOENMEKH" them. Ustinov,² St. Petersburg State Marine Technical University, Russian Federation

Annotation. The most important energy used both in production and in transport is mechanical energy (movement of cars, trains, ships, etc.). Electrical energy is used, in particular, in all kinds of communication methods, radio engineering, automation, etc. Internal energy is used directly in chemical and technological processes, metallurgy, etc. Mechanical energy is difficult to transfer from the source to the consumer. Internal energy is difficult to convert into other types of energy. In this regard, electrical energy has an undeniable advantage: it can be transmitted over vast distances, simply and conveniently distributed among different consumers, and finally, with the help of fairly simple devices, it can be easily converted into other types of energy. The great advantage of electrical energy is that it is the only type of energy used in radio engineering (radiophysics), electronic computing technology, communications and automation. The interdisciplinary focus of modern computing systems makes it possible to pose and solve numerical modeling problems in various fields of science and technology. This paper presents the results of numerical simulations aimed at studying the interaction of hydrodynamic and magnetic fields. The maximum effect of this interaction is achieved when the vectors of flow velocity and magnetic field induction are mutually perpendicular. This work examines one of these situations. The model formulation of the problem allows us to better understand certain aspects of this interaction. The performed numerical modeling shows that the local rotational motion of a conducting fluid located in an external uniform magnetic field induces an electric field.

Keywords: numerical modeling, conducting fluid, flow velocity, potential difference, electric field, mathematical model.

For citation: Stepan Y. Malamanov, Valery A. Pavlovsky. On the generation of an electric field caused by the circular motion of a conducting medium. Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 276—281. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.033

Введение

Устройствами, преобразующими энергию того или иного вида в электрическую, являются генераторы. К ним относятся гальванические элементы, электростатические машины, солнечные батареи, МГД-генераторы и т.п [1]. Преобладающую роль играют электромеханические индукционные генераторы переменного тока, в которых происходит превращение механической энергии в электрическую. Во многих случаях действие основано на явлении электромагнитной индукции [2,3,5], однако бывают и другие физические ситуации [4,6,11]. Так при движении проводящей среды, находящейся в магнитном поле, в ней индуцируются электрические поля и токи, на которые действует магнитное поле и которые, в свою очередь, способны влиять на магнитное поле [7-10, 12]. В результате этого, возникает сложная картина взаимодействия гидродинамического и электромагнитного полей [13]. Максимальный эффект этого взаимодействия достигается, когда вектор скорости потока перпендикулярен вектору индукции магнитного поля. Например, линейное магнитное поле при круговом движении проводящей жидкости. Помимо этого, такое движение жидкости является понятным гидродинамическим источником, что особенно важно при изучении индуцированного поля.

В работе рассматривается проводящая среда ($\sigma = 5 \text{ См/м}$), внутри которой выделен узкий торообразный канал, в котором движется проводящая жидкость – рисунок 1. Рассмотрение именно такой формы преследует две цели: во-первых, такое круговое движение можно рассматривать как движение без «атмосферы» (то есть сосредоточить внимание на наиболее существенном в процессе), во-вторых – тор подобен «тонкому» кольцу, а течение жидкости в нем напоминает протекание электрического тока по витку.

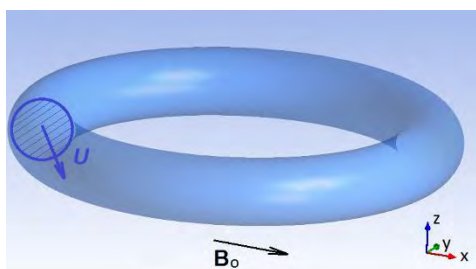


Рис. 1. Схема торообразного канала и направление приложения внешнего магнитного поля.

Внешнее магнитное поле $B_0 = 0,1 \text{ Тл}$ приложено горизонтально в направлении оси OX . Жидкость внутри канала движется со скоростью $u = 0,5 \text{ м/с}$. Электрическое поле отсутствует.

Стационарный случай

Для дальнейшего потребуются вспомогательные построения – окружности, вдоль которых строятся распределения интересующих физических величин. 1 и 3 – окружности в верхней и нижней частях тора, а 2 – окружность в горизонтальной плоскости симметрии. Это видно на рисунке 2:

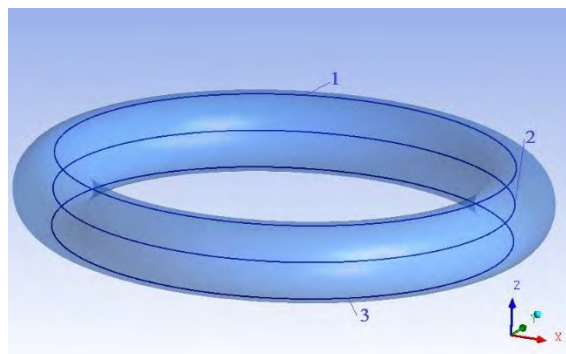


Рис. 2. Расположение вспомогательных линий

В рассматриваемом случае кругового движения жидкости проекция её скорости, например, на ось OX , изменяется гармонически; это иллюстрирует рисунок 3:

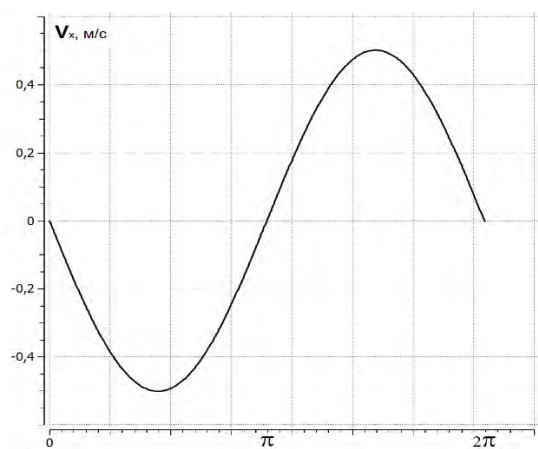


Рис. 3. Распределение проекции скорости в средней части объема

Такое поведение в однородном магнитном поле приводит к периодически изменяющейся силе Лоренца. На рисунке 4 представлены распределения удельной силы Лоренца и проекции вектора скорости вдоль линии 2 (см. рисунок 2):

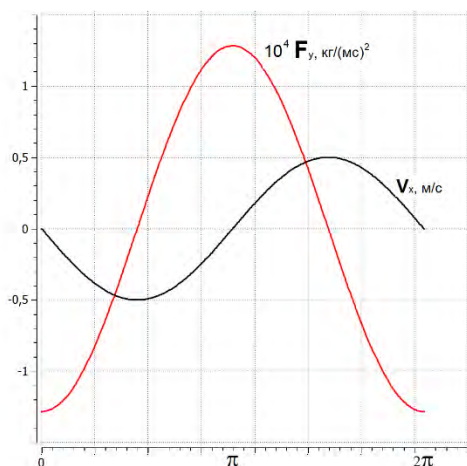


Рис. 4.

Проводящая жидкость в целом нейтральна, однако при её движении в магнитном поле действие силы Лоренца приводит к разделению зарядов. Возникает дипольный момент и разность

потенциалов, которая помимо силы Лоренца обусловлена еще и появившейся силой Кулона, действующей на поляризованные заряды. При движении жидкости вдоль тора происходит периодическое изменение указанных сил. Описанный механизм иллюстрирует рисунок 5. На этом графике по оси X отложен центральный угол окружностей **1** и **3**, а по оси Y значение потенциала – Φ .

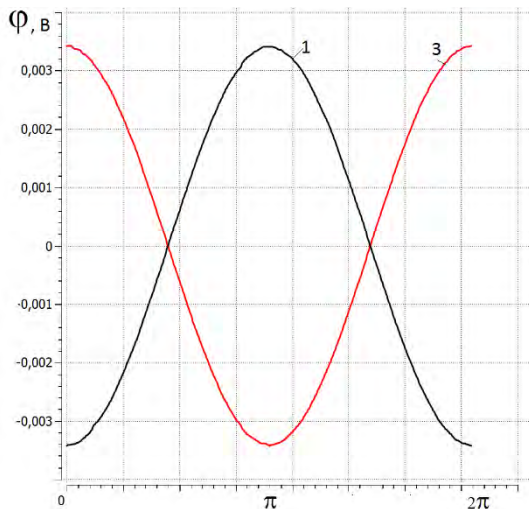


Рис. 5 Изменение потенциала вдоль окружностей **1** и **3**.

Такое поведение энергетической характеристики электрического поля безусловно отражается и на поведении силовой характеристики поля – напряженности. Рассмотрим, как меняется напряженность индуцированного электрического поля в плоскости симметрии и напомним, что в начале электрического поля в системе не было.

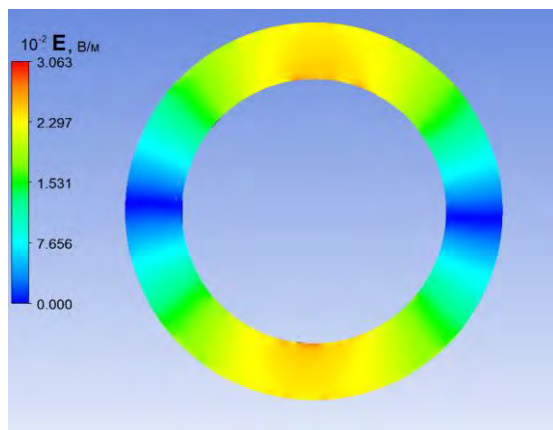


Рис. 6 Распределение напряженности индуцированного электрического поля.

Хорошо виден сложный характер поведения индуцированного поля. Лишний раз это иллюстрирует распределение вертикальной составляющей напряженности, что показано на рисунке 7:

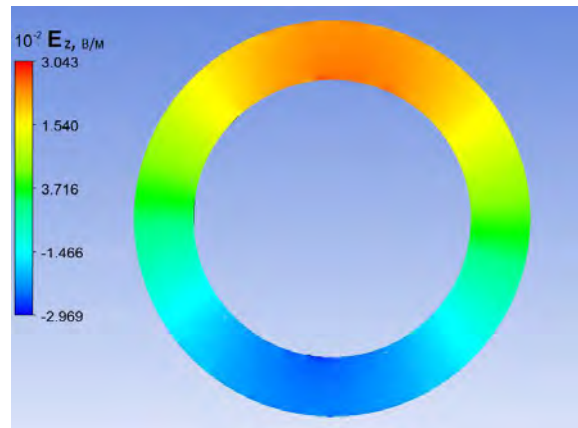


Рис. 7 Распределение вертикальной составляющей напряженности индуцированного электрического поля.

Более наглядно поведение вектора напряженности электрического поля в противоположных сечениях тора показаны на рисунке 8.

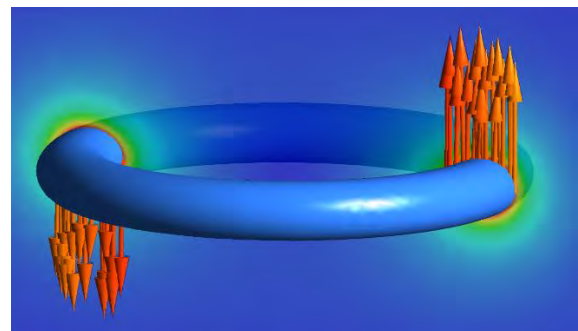


Рис. 8 Вектор напряженности индуцированного электрического поля в противоположных сечениях тора

Изменение вертикальной составляющей напряженности индуцированного электрического поля вдоль окружности тора **2** показано на рисунке 9.

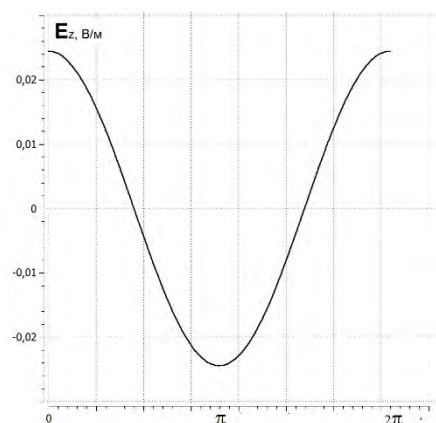


Рис. 9 Изменение вертикальной составляющей напряженности индуцированного электрического поля вдоль окружности **2**

Как известно, между напряженностью электрического (электростатического) поля и изменением потенциала существует однозначная связь:

$$E_i = -\frac{\Delta\phi}{\Delta l},$$

где $\Delta\phi$ изменение потенциала вдоль силовой линии между двумя точками, расстояние между которыми - Δl . Эта связь существует и в рассматриваемом случае. Нижеследующий рисунок 10 является фактически «объединением» распределений, представленных на рисунках 5 и 9:

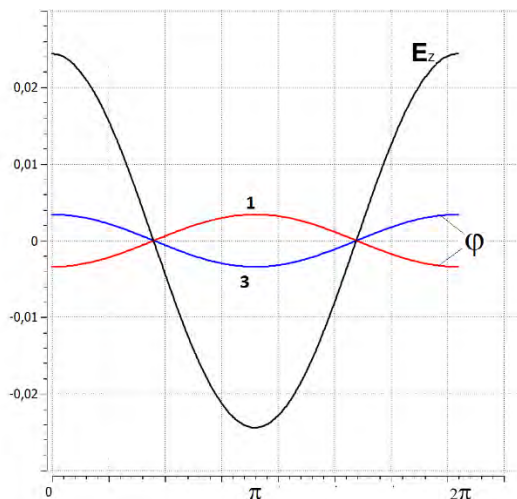


Рис. 10

Все предыдущее относилось к стационарному случаю. Теперь рассмотрим некоторые результаты решение нестационарной задачи.

Нестационарный случай

Начальная скорость жидкости $u = 0,5$ м/с, $B_0 = 0,1$ Тл. В данном случае, в качестве вспомогательных построим две диаметрально противоположные точки, лежащие на окружности **2**. Именно в этих точках и «наблюдается» изменение интересующих физических величин, как функции времени.

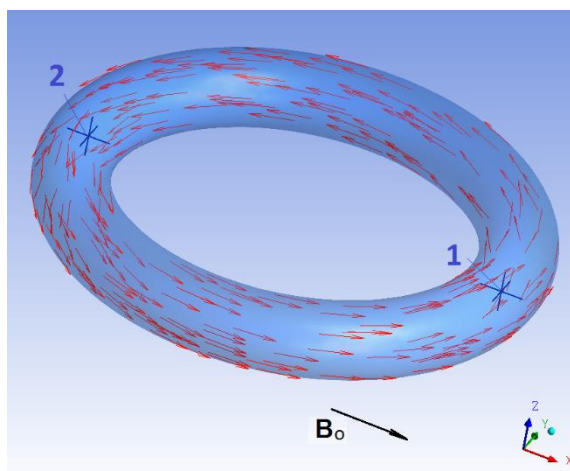


Рис. 11. Расположение вспомогательных точек

В этой связи, наибольший интерес представляет поведение вертикальной (как наибольшей) составляющей напряженности индуцированного электрического поля. На рисунке 12 показаны

распределения E_z в зависимости от времени - горизонтальная ось.

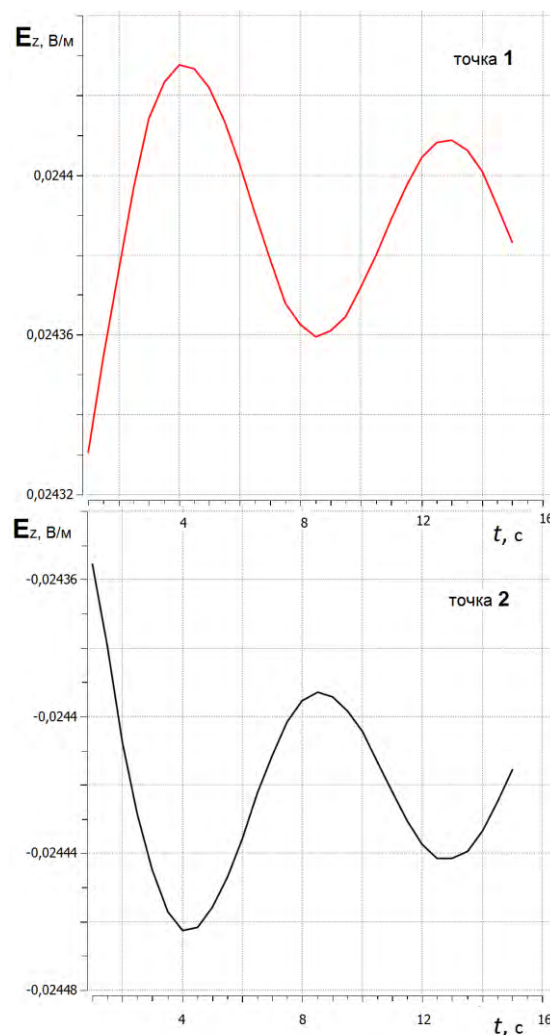


Рис. 12. Изменение вертикальной составляющей напряженности индуцированного электрического поля в точках **1** и **2**

Хорошо видно, что значение указанной составляющей изменяется периодически. При этом колебания в точках **1** и **2** происходят в противофазе, что находится в полном согласии с «физикой» задачи: с одной стороны, неизменное направление магнитного поля, с другой – скорость меняет свое направление на противоположное, а вместе с ней и сила Лоренца.

Заключение

По результатам работы можно сделать вывод о том, локальное круговое движение проводящей среды, находящейся в однородном магнитном поле, приводит к появлению индуцированного электрического поля, периодически меняющегося со временем.

Литература

1. Тамм И.Е. Основы теории электричества: Учебное пособие для вузов. – 11-е изд., исп. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 616 с.
2. Брагинский С.И. К магнитной гидродинамике слабо проводящих жидкостей // ЖЭТФ. 1959. Т.37, вып.5(11). С.1417–1430.
3. Эльзассер В.М. Магнитная гидродинамика // УФН. 1958. Т.LXIV, вып.3. С.530 – 586.
4. Жмур В.В. О вариациях электромагнитных полей, индуцированных океаническими движениями синоптического масштаба // Геомагн. и аэронаом. 1980. XX. №4. – С 693-700.
5. Кирко И.М., Кирко Г.Е. Магнитная гидродинамика. Современное видение проблем. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевский институт компьютерных исследований, 2009. – 632с.
6. Савченко В.Н., Смагин В.П., Фонарев Г.А. Вопросы морской электродинамики: Монография. – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 1999. – 208 с.
7. Бычков В.С., Жмур В.В., Лапшин В.Б. Об электромагнитных эффектах при колебании заряженной поверхности моря // Геомагнетизм и аэронаомия. 1979. №4т.XIX 2020, С.762 – 764.
8. Трофимов И.Л. К изучению электромагнитного поля, вызванного движением в безграничном море // Геомагн. и аэронаом. 1979. XIX. № 1. – С. 126–134.
9. Pukhtyar L. D., Kukushkin A. S. Investigation of the Electromagnetic Fields Induced by Sea Motion // Physical Oceanography. 1996. Vol. 7. № 1. P. 33-41.
10. Waskas M., Kharkats Y. Magnetoconvection phenomena. A mechanism for influence of magnetical processes. // J. Phys. Chem. 1999. 103. №23. P.4876 – 4883.
11. Семкин С.В., Смагин В.П., Савченко В.Н. Генерация возмущений магнитного поля при подводном взрыве // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. №1. С. 138-141.
12. Сажин Ф.М., Болога М.К. и др. Диспергирование и транспорт низкоомной жидкости под действием электрического поля. // Электронная обработка материалов. 1985. №3 С. 56 – 60.
13. Маламанов С.Ю. Численное моделирование задач о силовом взаимодействии гидродинамического и электромагнитного полей // Известия РАН. Математическое моделирование. 2015 год. Том 27. №11. С. 56-62.

References

1. Tamm I.Ye. Osnovy teorii elektrichestva: Uchebnoye posobiye dlya vuzov [Fundamentals of the theory of electricity: Textbook for universities]. 11-ye izd., isp. i dop. – M.: FIZ-MATLIT, 2003. 616 s
2. Braginskiy S.I. K magnitnoy gidrodinamike slabo provodyashchikh zhidkostey [On magnetohydrodynamics of weakly conducting liquids] // ZHETF. 1959. T.37, vyp.5(11). S.1417–1430.
3. El'zasser V.M. Magnitnaya gidrodinamika [Magnetohydrodynamics] // UFN. 1958. T.LXIV, vyp.3. – S.530 – 586.
4. Zhmur V.V. O variatsiyakh elektromagnitnykh poley, indutsirovannykh okeanicheskimi dvizheniyami sinopticheskogo masshtaba [Variations of electromagnetic fields induced by oceanic motions of synoptic scale] // Geomagn. i aeronom. 1980. XX. №4. – S 693-700.
5. Kirko I.M., Kirko G.Ye. Magnitnaya gidrodinamika. Sovremennoye videniye problem [Magnetic hydrodynamics. Modern vision of problems] – M.-Izhevsk: NITS «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», Izhevskiy institut komp'yuternykh issledovaniy, 2009. – 632 s.
6. Savchenko V.N., Smagin V.P., Fonarev G.A. Voprosy morskoy elektrodinamik [Problems of Marine Electrodynamics] i: Monografiya. – Vladivostok: Izd-vo VGUEiS, 1999. – 208 s.
7. Bychkov V.S., Zhmur V.V., Lapshin V.B. Ob elektromagnitnykh effektakh pri kolebanii zaryazhennoy po-verkhnosti moray [On electromagnetic effects during oscillation of the charged surface of the sea // Geomagnetism and Aeronomy] // Geomagnetizm i aeronomiya. 1979. №4t.XIX 2020, S.762 – 764.
8. Trofimov I.L. K izucheniyu elektromagnitnogo polya, vyzvannogo dvizheniyem v bezgranichnom more [To the study of the electromagnetic field caused by movement in the limitless sea] // Geo-magn. i aeronom. 1979. XIX. № 1. – S. 126–134.
9. Pukhtyar L. D., Kukushkin A. S. Investigation of the Electromagnetic Fields Induced by Sea Motion // Physical Oceanography. 1996. Vol. 7. № 1. P. 33-41.
10. Waskas M., Kharkats Y. Magnetoconvection phenomena. A mechanism for influence of magnetical processes. // J. Phys. Chem. 1999. 103. №23. P.4876 – 4883.
11. Semkin S.V., Smagin V.P., Savchenko V.N. Generatsiya vozmushcheniy magnitnogo polya pri podvodnom vzryve [Generation of magnetic field perturbations in an underwater explosion] // Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana. 2010. T. 46. №1. S. 138-141
12. Sazhin F.M., Bologa M.K. i dr. Dispergirovaniye i transport nizkoomnoy zhidkosti pod deystviyem elektricheskogo polya. // Elektronnaya obrabotka materialov. 1985. №3 S. 56 – 60.
13. Malamanov S.YU. Chislennoye modelirovaniye zadach o silovom vzaimodeystvii gidrodinamicheskogo i elektromagnitnogo polya // Izvestiya RAN. Matematicheskoye modelirovaniye. 2015 god. Tom 27. №11. S. 56-62.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Маламанов Степан Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Механика деформируемого твёрдого тела», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Устинова. 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1 e-mail: stevmal@mail.ru

Stepan Y. Malamanov, Dr. Sci. (Phys & Math.), Professor of the Department of "Mechanics of a deformable solid", Baltic State Technical University "VOENMEH" named after Ustinova. 190005, St. Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya St., 1 e-mail: stevmal@mail.ru

Павловский Валерий Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Теплофизические основы судовой энергетики». Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. 190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3. e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

Valery A. Pavlovsky, Dr. Sci. (Phys & Math.), Professor, Professor of the Department of Thermophysical Basics of Ship Energy. St. Petersburg State Marine Technical University. 190008, St. Petersburg, ul. Pilot, 3. e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 13.02.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.02.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 22.02.2024.

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.034>

Исследование взаимного влияния корпуса маломерного судна и измерительной аппаратуры с использованием численного моделирования полей скорости

Чебан Е.Ю.¹ egor.cheban.2@gmail.com, Лукина Е.А.¹ evair@yandex.ru, Кожевников А.И.¹ nertenro@ro.ru, Капустин И.А.^{1,3} kapustin-i@yandex.ru Никущенко Д.В.² ndmitry@list.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта», ²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ³Институт прикладной физики РАН

Аннотация. Изучение гидрологии водоемов остается актуальной проблемой для решения большого круга практических задач. Одним из способов исследования полей скорости на водных объектах является применение ADCP – акустических доплеровских профилографов течений (Acoustic Doppler Current Profiler) различных модификаций и производителей. В настоящей работе представлены результаты исследования взаимного влияния корпуса маломерного научно-исследовательского тримарана и профилографа ADCP с помощью методов вычислительной гидродинамики. Исследовано влияние различных вариантов крепления ADCP на гидродинамику судна, а также получены вызванные скорости при движении тримарана, в том числе с различными вариантами размещения профилографа по длине и глубине судна. Выявлены области неблагоприятной интерференции потоков вокруг корпуса судна и измерительного оборудования. Предварительные оценки показывают, что величина корректировки измеряемых ADCP скоростей, может составлять 5-10% в зависимости от места его расположения. Полученные значения сопротивления и поля вызванных скоростей позволяют выбрать место расположения профилографа по длине судна, обеспечивающее минимизацию сопротивления и вызванных скоростей, влияющих на точность работы прибора. Результаты исследования могут быть использованы в практических целях для определения места и способа крепления ADCP на исследовательских судах.

Ключевые слова: численное моделирование, ADCP (Акустический доплеровский профилограф течений), вызванные скорости, маломерное судно, профиль скорости, CFD, интерференция потоков, тримаран

Для цитирования: Чебан Е.Ю., Лукина Е.А., Кожевников А.И., Капустин И.А., Никущенко Д.В. Исследование взаимного влияния корпуса маломерного судна и измерительной аппаратуры с использованием численного моделирования полей скорости. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 282—291. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.034

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.034>

Investigation of the hydrodynamic impact between scientific boat hull and measuring equipment on a basis of numerical modeling of velocity fields

Egor Yu. Cheban¹ egor.cheban.2@gmail.com, Evgeniya A. Lukina¹ evair@yandex.ru,

Artur I. Kozhevnikov¹ nertenro@ro.ru Ivan A. Kapustin^{1,3} kapustin-i@yandex.ru

Dmitry V. Nikushchenko² ndmitry@list.ru

¹Volga State University of Water Transport, Russian Federation, ²St. Petersburg state marine technical university Russian Federation, ³Institute of Applied Physics, Russian Federation

Abstract. Investigation of hydrology of reservoirs remains an important issue in solution of a wide range of practical problems. One of practical way to learn velocity fields around bodies could be to use different types of ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). The article presents the results of a research of the hydrodynamic interaction between the hull of a scientific boat and ADCP unit on a basis of numerical simulation of velocity fields. The influence of various ADCP mounting options on the hydrodynamics of the scientific boat was studied. The induced velocities during the movement of the trimaran were obtained, including influence of different locations of the profiler along its length and depth. Regions of unfavorable interference of flows around the hull and measuring equipment have been obtained. Preliminary predictions show that the amount of correction to the measured ADCP velocity could be about 5-10 % depending on its location along the hull. The obtained values of resistance and the field of induced velocities make it possible to select the location of the ADCP unit, ensuring minimization of resistance and induced velocities that affect the accuracy of the device. The results of the research could be used to practically determine the location and method of attaching ADCP on research vessels.

Keywords: CFD, ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), relative velocity, trimaran boat, velocity profile, flow interference, ship's waves

For citation: Egor Yu. Cheban, Evgeniya A. Lukina, Artur I. Kozhevnikov, Ivan A. Kapustin, Dmitry V. Nikushchenko, Investigation of the hydrodynamic impact between scientific boat hull and measuring equipment on a basis of numerical modeling of velocity fields. Marine intellectual technologies. 2024. № 1 part 1, P. 282—291. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.034

Введение

Исследование гидродинамики рек, озер, водохранилищ является важной задачей при выполнении экологического мониторинга, строительстве гидротехнических сооружений, обеспечении судоходства, в том числе по малым рекам. Как правило, данных о средних скоростях течения на этих водных объектах для решения этих задач уже недостаточно, и требуется знание полей скорости для протяженных участков [1]. Использование классических методов построения полей скорости с использованием гидрометрических вертушек требует значительных временных и материальных затрат. Одним из способов исследования полей скорости на водных объектах является применение ADCP – акустических доплеровских профилографов течений (Acoustic Doppler Current Profiler) различных модификаций и производителей. Общий принцип работы ADCP заключается в излучении ультразвукового сигнала определенной частоты, который отражается от мелких частиц находящихся в воде: пузырьков воздуха, планктона, взвешенных частиц. Смещение частоты измеренного отражённого сигнала относительно частоты излученного сигнала с учетом стробирования по времени (при известной скорости звука) позволяет получить значения скоростей течения на разных глубинах. Перемещая прибор по сечениям водного объекта может быть построено трехмерное поле скоростей. Для этого в условиях ограниченных акваторий используются маломерные суда, особенностью которых является их немагнитность, т.к. в профилографе используется магнитный компас. Подобные суда использовались для выполнения работ по гранту Русского географического общества «Плавучий университет Волжского бассейна», в частности плавучая лаборатория Института прикладной физики РАН (ИПФ РАН) «Геофизик» [1].

Плавучая лаборатория «Геофизик» представляет собой маломерное научно-исследовательское судно (НИС), предназначенное для выполнения гидрофизических исследований акваторий внутренних водных путей имеющих ограничения, в том числе по глубине, с помощью специализированного радиолокационного и гидроакустического оборудования. Судно представляет собой немагнитный тримаран с надувными корпусами из ПВХ, к которым прикреплена палуба с надстройкой. Общий вид судна показан на рис. 1, характеристики судна приведены в табл. 1.

Пример векторного поля течений в приповерхностном слое, полученного с помощью ADCP, установленного на НИС «Геофизик» показан на рис. 2.

На крупнотоннажных исследовательских судах профилограф течений устанавливается, как правило, в шахтах, проходящих вертикально через корпус судна. На маломерных исследовательских судах такое расположение затруднено необходимостью обеспечения плавучести, поэтому ADCP размещают вне корпуса судна или между корпусами для многокорпусных судов. В этом случае профилограф будет являться выступающей частью, т.к. его размеры сопоставимы с поперечными

размерами корпуса судна (рис. 3), и, следовательно, существенным образом влияют на его гидродинамику.



Рис. 1. НИС ИПФ РАН «Геофизик»

Таблица 1

Характеристики НИС ИПФ РАН «Геофизик»		
1.	Длина, м	7,875
2.	Ширина, м	3,1
3.	Диаметр поплавка, м	0,6
4.	Поплавки	надувные, цилиндрической формы
5.	Количество поплавков	3
6.	Клиренс (расстояние между корпусами), м	0,65
7.	Осадка, м	0.150
8.	Высота надводного борта, м	0,630
9.	Водоизмещение, кг	1600
10.	Максимальная скорость, км/ч	15

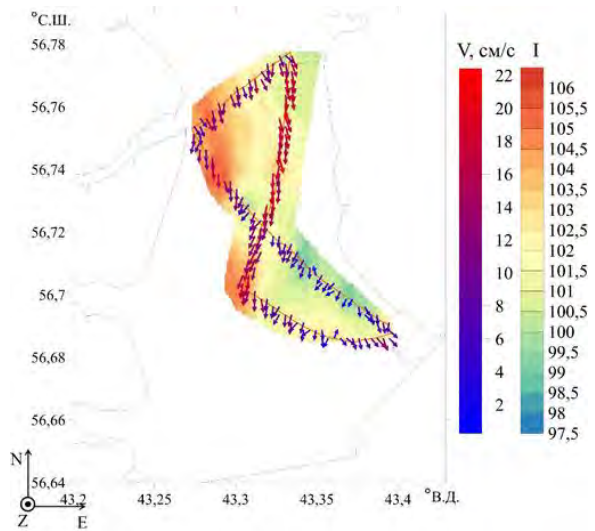


Рис. 2. Векторное поле течений в приповерхностном слое 0,6 м измеренное с помощью ADCP, установленного на НИС «Геофизик» на акватории Горьковского водохранилища. Цветом показано обратное акустическое рассеяние.

Создаваемое выступающими частями дополнительное сопротивление, в основном состоит из вязкостного сопротивления выступающих частей в неоднородном потоке пограничного слоя с учетом

взаимного влияния выступающих частей и дополнительного сопротивления корпуса, вызванного изменением картины его обтекания в районе расположения выступающих частей [8-11]. Волнообразование при движении судна также оказывает влияние на дополнительное сопротивление, создаваемое выступающими частями [2]. При этом более интенсивное волнообразование между корпусами катамаранов и тримаранов [2, 8] создает дополнительное орбитальное движение жидкости, которое вместе с движением жидкости в пограничных слоях, может оказывать влияние на измеряемые ADCP величины скоростей.

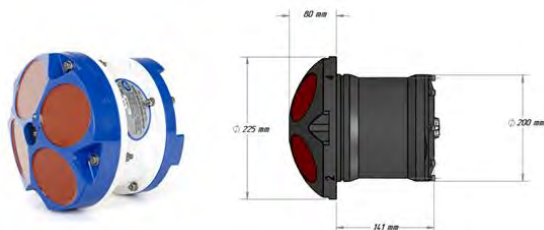


Рис. 3. Общий вид профилографа ADCP

Область измерений профилографа течений начинается на некотором расстоянии от излучателя и приемников, которое зависит от конкретной конструкции прибора, глубины его установки и общей глубины водоема в месте проведения измерений. Характеристики наиболее часто используемых профилографов приведены в табл.2.

Таблица 2

Характеристики профилографов ADCP

№	Производитель	Наименование	Частота (кГц)	Диапазон измерений (м)
1.	Teledyne RDI	WHRZ 1200	1200	0,3-21
		WHR 600	600	0,7-75
2.	SonTek/ Xylem Inc	SL1500	1500	0,15-10
		SL500	500	0,2-18
		RiverSurveyor S5	1000	0,2 – 15
		RiverSurveyor M9	500	0,2-80
3.	IFlow	RP600	600	0,8-90
		RP1200	1200	0,15-35

Таким образом, взаимодействие корпуса судна с профилографом приводит к образованию сложной структуры взаимовлияющих полей течений и соответственно к необходимости одновременного решения двух задач:

- оценки влияния размеров ADCP и его расположения на гидродинамические характеристики судна;
- исследование влияния судна на результаты измерения с помощью прибора, т.к. при движении судно изменяет поле скоростей в жидкости, которое попадает в область измерений прибора.

Использование профилографов ADCP, установленных на судах описано во многих работах, в том числе выполненных при участии авторов [1,3-5]. Также известны статьи [6, 7], в которых описано использование установленных на судах ADCP для

выполнения гидрологических исследований. Однако оценок влияния профилографов на гидродинамику судов в этих работах не приводится.

Методы исследования полей скорости при обтекании тел

Для расчёта вызванных скоростей при обтекании тел потоком жидкости развивались методы, предполагающие упрощения характеристик потока и формы тел: с учётом только потенциальной или вихревой форм течения, без учёта вязкости, условности геометрии, в том числе при рассмотрении задачи в плоской постановке.

К таким аналитическим методам относятся метод конформных отображений для плоских контуров, метод наложения простых пространственных потенциальных потоков, метод интегральных уравнений для расчёта тел произвольной формы, в том числе с учётом границ потока [8, 9]. и др. Каждый из этих методов для оценки поля скорости в области рассматриваемой конструкции приведёт к погрешностям по причине вышеперечисленных допущений, неприемлемых для измеряемых значений скоростей в естественных условиях. Однако приближённая оценка некоторых характеристик может помочь в анализе результатов численного моделирования обтекания в области обтекания рассматриваемой конструкции. До развития методов вычислительной гидродинамики, основанных на численных решениях уравнений Навье-Стокса, указанные методы применялись для вычисления поля скорости при обтекании корпуса судна с целью оптимизации обводов и определения сопротивления воды движению корпуса судна [7], что также косвенно может помочь анализировать полученные результаты моделирования.

Учёт свойств вязкой жидкости приводит к рассмотрению задачи обтекания с учётом пограничного слоя. Несмотря на невысокие скорости движения исследовательского судна с установленным профилографом, его относительные скорости, характеризующиеся числами Фруда $Fr_{L_{корп}} < 0,284$, характерны для волнообразующей зоны движения водоизмещающих судов. При этом режим движения в пограничном слое в точках установки профилографа при $Re \geq 11 \cdot 10^6$ развитый турбулентный. При использовании приближённых средств оценки, полученных для плоского пограничного слоя, его толщина, определённая по формуле

$$\delta_x^{турб} = 0,37 \left(\frac{v}{V_0 \cdot x} \right)^{1/5} \cdot x = 0,37 \cdot \frac{x}{Re_x^{0,2}}$$

составит $\delta \leq 85$ мм.

В то же время для профилографа число Фруда при той же скорости движения конструкции, составит

$$Fr_{d_{np}} = \frac{V_0}{\sqrt{g \cdot d}} \leq 1,45.$$

Рассмотрение обтекания вертикального цилиндра в потоке при близких числах Рейнольдса

$$Re_d = \frac{V_0 \cdot d}{\nu} = \frac{2,5 \cdot 0,3}{1 \cdot 10^{-6}} = 7,5 \cdot 10^5$$

показывает картину возмущения потока вокруг цилиндра в радиусе $R \geq 3d$ [11]. Эти факты при имеющихся размерах судна и профилографа говорят о неизбежном и ожидаемо значительном влиянии профилографа на обтекание ближайших корпусов тримарана. На практике это подтверждается постоянной вынужденной коррекцией курса при движении судна посредством рулевого управления.

При указанной на рис. 3 удалённости профилографа от корпуса тримарана вязкостная составляющая сопротивления корпуса будет оказывать незначительное влияние на поле скоростей в зоне измерения профилографа.

Волновая же составляющая сопротивления корпуса при указанных выше значениях числа Фруда будет давать изменение поля скоростей на более значительной глубине, в том числе и в зоне измерения профилографом.

Численное моделирование позволит оценить количественный вклад вызванных скоростей от взаимного влияния элементов конструкции на измерение скоростей и составление картин естественных течений в водных объектах.

С развитием методов численного моделирования вопросы взаимодействия конструкций и набегающего на них потока при различных скоростях движения, в том числе с учётом волнообразования, часто рассматривались в работах российских и зарубежных исследователей.

В зоне сходных чисел Фруда и размеров конструкций можно отметить работы [12-16], с результатами которых можно соотносить представленные в настоящей статье исследования.

Численное моделирование гидродинамики маломерного тримарана, оснащенного ADCP

Общий вид твердотельной геометрии тримарана показан на рис. 4. Моделирование выполнялось в натуральную величину с целью минимизации влияния масштабных эффектов. Профилограф размещался между корпусами судна в виде «свободного» крепления (на штанге, без моделирования самой штанги (рис. 4б)) и в специальной шахте квадратного сечения, выходящей под палубу (рис. 4в).

Расчетная сетка строилась исходя из условия обеспечения точности решения для свободной поверхности между корпусами тримарана и в области измерения ADCP. Параметры сетки, полученные, на основании исследования сеточной сходимости, приведены в табл. 3.

Учет трения в водоизмещающем режиме движения обеспечивался разрешением пограничного слоя 20-22 ячеек при $y^+ = 34,92$. Величина y^+ оценивалась с помощью встроенного алгоритма сеточного генератора HEXPRESS. Как показали результаты моделирования, на сетках с $y^+ = 1$ и $y^+ = 34,92$, величина сопротивления изменяется слабо, поэтому уменьшать величину y^+ и увеличивать количество ячеек сетки было нецелесообразно.

Использовалась комбинация начальных и граничных условий для глубокой воды [2].

Задача решалась в прямой постановке на тихой воде. Скорость движения судна изменялась в диапазоне 1,67 – 2,78 м/с с шагом 0,14 м/с. (0,5 км/ч). Максимальная скорость движения судна с

установленным ADCP ограничена 9 км/ч в соответствии с требованиями по эксплуатации приборов. Обеспечивалась только одна степень свободы – движение вперед, изменение посадки судна не моделировалось.

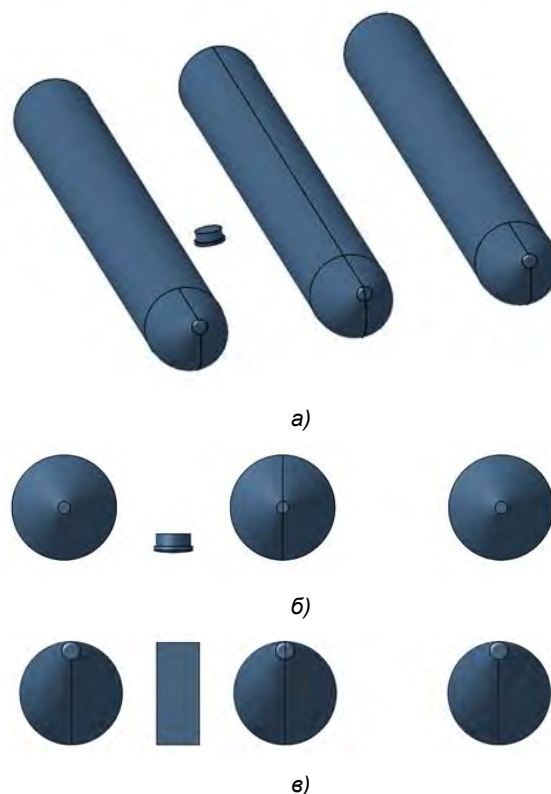


Рис. 4. Твердотельная геометрия тримарана с ADCP: а) общий вид с установленным ADCP; б) «свободное» крепление; в) «шахтное» крепление.

Таблица 3

Параметры сеток			
Параметр сетки	Сетка 1 (без ADCP)	Сетка 2 (ADCP свободный)	Сетка 3 (ADCP в шахте)
Начальная сетка (x:y:z):	28:12:12	28:12:12	28:12:12
Адаптация:			
корпуса	7	7	7
транцев	8	8	8
носа	8	8	8
ADCP	-	8	8
Свободная поверхность	8	8	8
Дополнительная адаптация волновой поверхности	8 (волновой сектор)		
y^+	34,9218	34,9218	34,9218
Общее количество ячеек	7953135	8019824	8407065

Число Фруда:

- судна (Fr_c): 0,19 - 0,32 (шаг 0,02);
- ADCP (Fr_n): 1,07 – 1,78 (шаг 0,09).

Число Рейнольдса:

- судна (Re_c): 10779,7 - 17944,6;
- ADCP (Re_n): 342 – 570.

При моделировании использовалась «К- ω SST» модель турбулентности [14,15].

Результаты и обсуждение

Исследовалось влияние расположения ADCP на гидродинамику тримарана в следующих случаях:

1. тримаран без ADCP (контрольный);
2. ADCP установлен между корпусами в следующих точках, (отсчет от кормы), м:

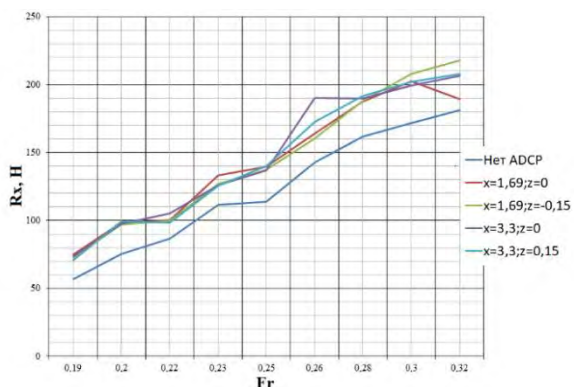
$$x_1=1,69 \text{ и } z_1=0;$$

$$x_1=1,69 \text{ и } z_2=-0,15;$$

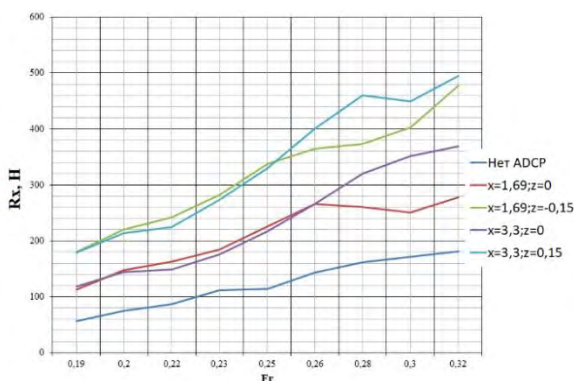
$$x_2=3,3 \text{ и } z_1=0;$$

$$x_2=3,3 \text{ и } z_2=-0,15.$$

С точки зрения влияния выступающих частей, размещение профилографа между корпусами ожидаемо приводит к увеличению сопротивления и появлению дополнительного момента M_z . При этом «шахтное» крепление существенно повышает сопротивление (рис. 5), что обусловлено формой шахты. Также сопротивление увеличивается с увеличением глубины погружения прибора. Интересны случаи размещения прибора в шахте на расстоянии 1,69 м от транца при $Fr=0,3$, когда на кривых наблюдаются локальные минимумы, что по всей видимости может быть связано с интерференцией потоков между корпусами судна и шахтой прибора (рис.6).



а)



б)

Рис. 5. Полное сопротивление тримарана с установленным ADCP: а) «свободное» крепление; б) «шахтное» крепление.

Для получения данных о вызванных скоростях в программном модуле CFview строились графики компонент скорости (V_x , V_y , V_z и V_m) в ДП судна и в плоскости на половине расстояния между корпусами

на глубинах 0,5; 1; 2; 3; 4 и 5 м. Кроме того, для анализа использовались заливки поля скоростей и отображение волновой поверхности (рис. 7).

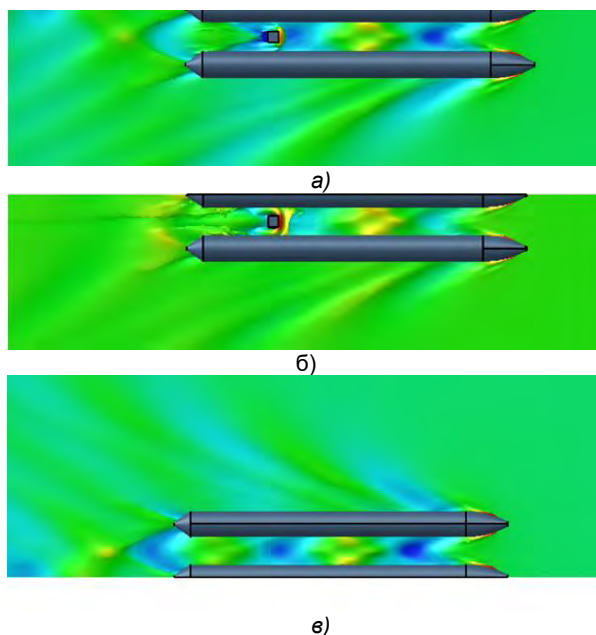


Рис. 6. Волновые поверхности в междукорпусном пространстве тримарана при $Fr=0,3$: а) «шахтное» крепление, $z=0$ м; б) «шахтное» крепление $z=-0,15$ м; в) без ADCP.

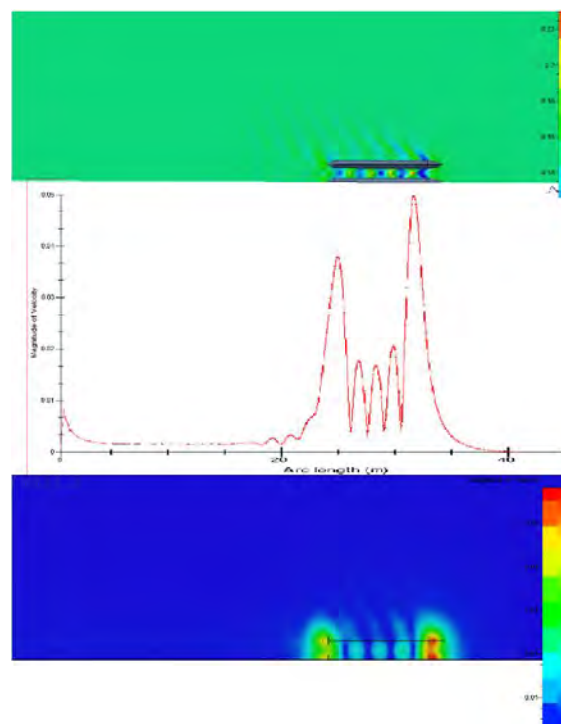


Рис. 7. Волновая поверхность и распределение вызванных скоростей между корпусами тримарана без ADCP на глубине 0,5 м.

Расположение профилографа в носу не рассматривалось, т.к. моделирование тримарана без установленного прибора показало, что в этой области образуется зона повышенных значений вызванных скоростей, связанных с интенсивным волнообразованием в носовой части тримарана (рис.

7). Также на рис. 7 показаны распределения вызванных скоростей на глубине 0,5 м и волновая поверхность.

Рис. 7. показывает хорошую корреляцию между вызванными орбитальными скоростями, возникающими вследствие волнообразования: пикам скорости соответствуют подошвы волн, а наибольшие значения вызванных скоростей наблюдаются в носовой и кормовой частях корпусов тримарана.

Возникновение вызванных скоростей при трансформации носовых систем волн показано, например, в работах [13-15]. Необходимо отметить, что величины V_x и V_z имеют очень близкие значения, в то время как поперечная составляющая V_y отличается на порядок. Это вполне соответствует представлению об орбитальном движении частиц жидкости в волне.

Вызванные скорости по глубине предположительно изменяются по квадратичному закону и на глубинах более 2 м (рис. 8) отличаются от значений на глубине 0,5 м на порядок.

При повышении скорости судна максимальные значения вызванных скоростей изменяются весьма неравномерно, и корреляция между скоростью судна и вызванными скоростями обусловлена процессами волнообразования в междукорпусном пространстве тримарана.

«Шахтное» крепление ADCP приводит к повышению вызванных скоростей в среднем от 30 до 50 процентов по сравнению с контрольным тримараном без измерительного оборудования. В то же время скорости по глубине изменяются более равномерно, но глубина, на которой проявляется влияние движения судна увеличивается.

Заглубление профилографа со «свободным» креплением под поверхность жидкости, в ряде случаев, приводит к снижению вызванных скоростей до 30-40%, что может быть связано с более благоприятной интерференцией потоков профилографа и корпуса судна в процессе волнообразования в зависимости от погружения прибора. В случае «шахтного» крепления происходит повышение вызванных скоростей в среднем на 5-7%, причем эти изменения существенны на глубинах до 1,5 м, что обусловлено формой шахты, поскольку с ее погружением сопротивление возрастает на 50% и более.

Заключение

На основании результатов численного моделирования выполнено исследование взаимного влияния корпусов маломерного судна и установленного погружного измерительного оборудования с различными вариантами крепления.

Исследование показало, что:

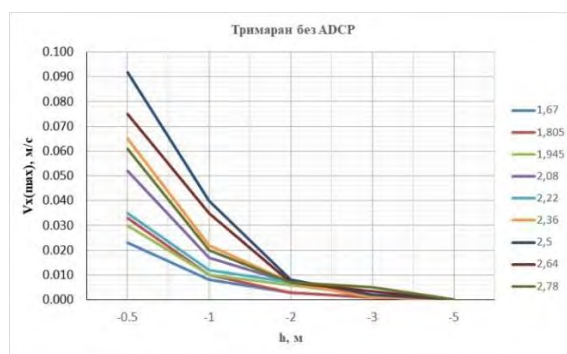
- измерительное оборудование – акустический доплеровский измеритель течений существенно влияет на гидродинамические характеристики маломерного тримарана в части повышения сопротивления на величину порядка 50%, а также появления дополнительного момента относительно оси Z ;

- возникающие при движении тримарана вызванные скорости, измеренные в продольном сечении междукорпусного пространства, имеют по всей видимости, волновую природу и убывают с глубиной по квадратичному закону;

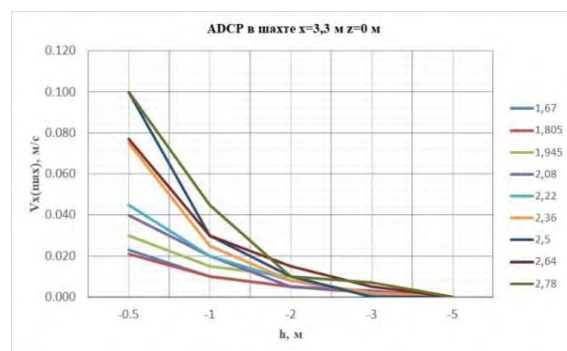
- «свободное» крепление профилографа не приводит к существенному дополнительному росту вызванных скоростей. Для «шахтного» крепления наблюдается более интенсивный рост вызванных скоростей;

- выявлены области неблагоприятной интерференции потоков вокруг корпуса судна и измерительного оборудования (смещение «шахтного» крепления к миделю и его заглубление при скоростях движения тримарана больших 1,805 м/с, а также носовая волна и кормовой бурун во всех случаях);

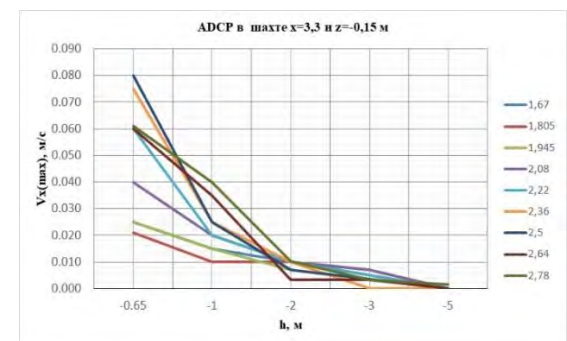
- предварительные оценки показывают, что величина корректировки измеряемых ADCP скоростей на верхних горизонтах может составлять 5-10% в зависимости от места его расположения. Данный вывод предполагается проверить натурными измерениями в ходе дальнейших исследований.



а)

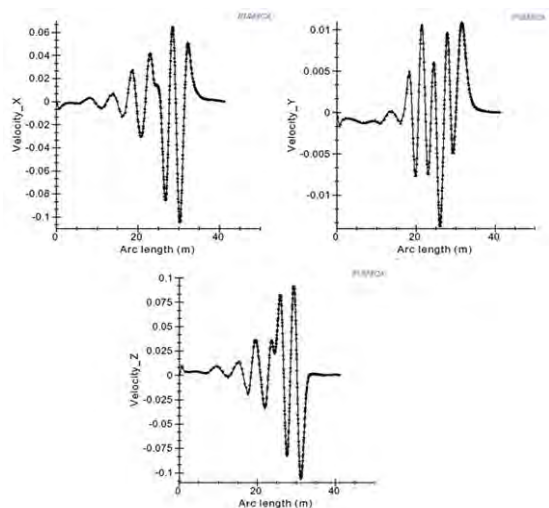


б)

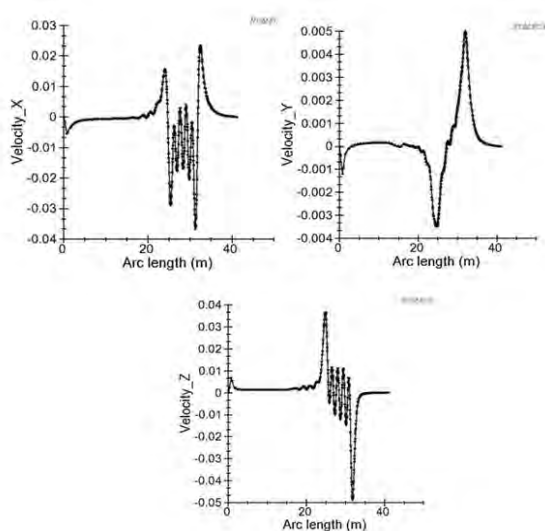


в)

Рис. 8. Графики изменения компоненты V_x вызванных скоростей по глубине: а) без ADCP; б) ADCP в точке $x=3,3$ м, $z=0$ м; в) ADCP в точке $x=3,3$, $z=-0,15$ м.



а)



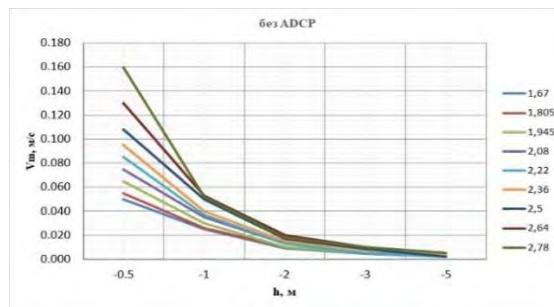
б)

Рис. 9. Распределение компонент вызванных скоростей в потоке по длине тримарана:

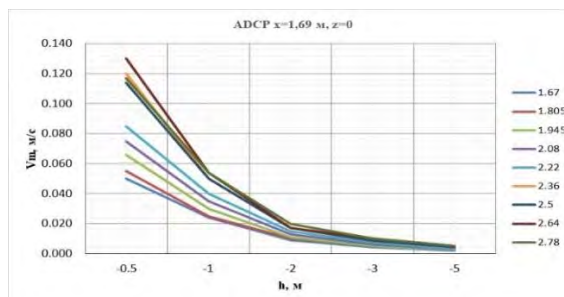
а) $V_c=1,67$ м/с; б) $V_c=2,78$ м/с.

Полученные значения сопротивления и поля вызванных скоростей позволяют выбрать оптимальное место расположения профилографа по длине судна, обеспечивающее минимизацию сопротивления и вызванных скоростей, влияющих на точность работы прибора. Данный результат может иметь большое практическое значение, поскольку до настоящего времени данный аспект использования ADCP не анализировался достаточно глубоко, а рекомендации по креплению, разрабатываемые производителями, зачастую имеют слишком общий характер.

Кроме того, полученные результаты представляют интерес с точки зрения проектирования многокорпусных маломерных судов и исследования их волнового сопротивления.

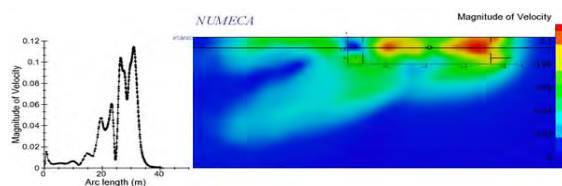


а)

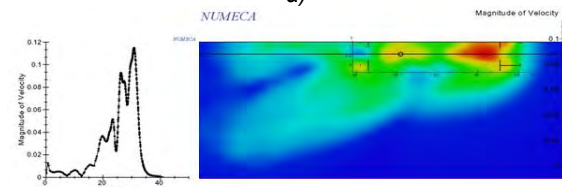


б)

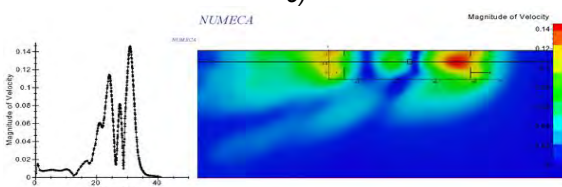
Рис. 11. Изменение суммарных значений вызванных скоростей по глубине: а) тримаран без ADCP; б) тримаран с «свободным» креплением ADCP при $x=1,69$ м, $z=0$ м.



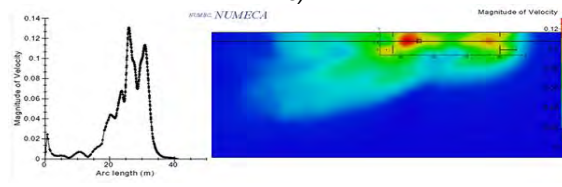
а)



б)



в)



г)

Рис. 10. Распределение суммарного значения вызванной скорости в потоке около судна при разных вариантах крепления профилографа: а) «свободное» $x=3,3$ м $z=2,78$ м/с; б) «свободное» $x=1,69$ м $z=2,78$ м/с; в) «шхтное» $x=3,3$ м $z=2,78$ м/с; г) «шхтное» $x=1,69$ м $z=2,78$ м/с.

Литература

1. О формировании изолированной линзы речного стока круговоротом в Горьковском водохранилище / Капустин И. А., Ермаков С.А., Смирнова М. В. [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 6. – С. 214-221. – DOI 10.21046/2070-7401-2021-18-6-214-221. – EDN JJIVWX.
2. Исследование гидродинамики выступающих частей маломерного судна численными методами / Е. Ю. Чебан Е. Ю., Мартеньянова О. В., Кожевников А. И., Молюков А. А. // Научные проблемы водного транспорта. – 2022. – № 72. – С. 54-69. – DOI 10.37890/jwt.vi72.272. – EDN HMNXXN.
3. Experimental study of turbulent-wake expansion from a surface ship Ermakov S.A., Kapustin I.A. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2010. T. 46. № 4. С. 524-529
4. Исследование влияния режима работы ГЭС на перераспределение фитопланктона в верхнем водном слое в приплотинном участке Горьковского водохранилища / Доброхотова Д.В., Капустин И.А., Молюков А.А., Лещев Г.В. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 1. С. 242-252
5. Натурные подспутниковые наблюдения конвергентных течений в приповерхностном слое воды по их пенным образам / Капустин И.А., Вострякова Д.В., Молюков А.А., Даниличева О.А., Лещёв Г.В., Ермаков С.А. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 188-196.
6. Alberto Ribotti, Mireno Borghini, Andrea Satta, Paolo Magni. Ship-Mounted Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP): Characteristics and Field Applications to Measure Coastal Hydrodynamics Encyclopedia of Water 10.1002/9781119300762.wsts0084 2019, p. 1-11
7. Li, C.; Boswell, K.M. Estimating Water Transport from Short-Term Vessel-Based and Long-Term Bottom-Mounted Acoustic Doppler Current Profiler Measurements in an Arctic Lagoon Connected to the Beaufort Sea. Sensors 2022, 22, 68. <https://doi.org/10.3390/s22010068>
8. Войткунский Я.И., Фаддеев Ю.И., Федяевский К.К., Гидромеханика: Учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1982. – 456 с., ил.
9. Справочник по теории корабля : В трёх томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители/Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 768 с., ил.
10. Павленко Г.Е.. Сопротивление воды движению судов. — М: Морской транспорт, 1956. — 507 с.
11. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа.: - М.: Мир, 1986. -184 с.
12. Dong, R., Katz, J., & Huang, T. (1997). On the structure of bow waves on a ship model. Journal of Fluid Mechanics, 346, 77-115. doi:10.1017/S0022112097005946 [<https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid-mechanics/article/abs/on-the-structure-of-bow-waves-on-a-ship-model/DED9D70A407568AF896AC439FBA187C?01.11.2023>]
13. Gary I. Roth, Daniel T. Mascenik, Joseph Katz; Measurements of the flow structure and turbulence within a ship bow wave. Physics of Fluids 1 November 1999; 11 (11): 3512–3523. <https://doi.org/10.1063/1.870209>
14. Olivieri, A., Pistani, F. & Mascio, A. Breaking wave at the bow of a fast displacement ship model. J Mar Sci Technol 8, 68–75 (2003). <https://doi.org/10.1007/s00773-003-0155-5>
15. Razgallah I, Kaidi S, Smaoui H, Sergeant P. Experimental Study of the Impact of Drift, Depth, and Lateral Restrictions on Inland Ship-Induced Waves under Small and Moderate Ship Speeds. Civil Eng Res J. 2021; 11(4): 555818. DOI: 10.19080/CERJ.2021.11.555818
16. Fontaine, E., Faltinsen, O., & Cointe, R. (2000). New insight into the generation of ship bow waves. Journal of Fluid Mechanics, 421, 15-38. doi:10.1017/S0022112000001397
17. Лукина, Е. А. Оценка гидродинамического воздействия судна на водный объект с использованием численных методов / Лукина Е. А., Чебан Е. Ю., Глухова В. С. // Проблемы экологии Волжского бассейна : Труды 6-й всероссийской научной конференции, Нижний Новгород, 24–25 ноября 2021 года. Том Выпуск 4. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2021. – С. 19. – EDN TYEAT.
18. Исследование волнообразования большегрузного катамарана для внутренних водных путей численными методами / Чебан Е. Ю., Лукина Е. А., Митрошин С. Г. [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 3-1(61). – С. 210-219. – DOI 10.37220/MIT.2023.61.3.021. – EDN PERDQG.

References

1. formirovaniy izolirovannoy linzy reghnogo stoka krugovorotom v Gor'kovskom vodohranilishе [On the formation of an isolated lens of a river runoff by a whirlpool in the Gorky reservoir] / Kapustin I.A., Ermakov S.A., Smirnova M.V., Vostryakova D.V., Mol'kov A.A., Cheban E.Yu., Leshchev G.V. // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2021. – T. 18. – № 6. – S. 214-221. – DOI 10.21046/2070-7401-2021-18-6-214-221. – EDN JJIVWX
2. Issledovanie gidrodinamiki vystupayushih chastey malomernogo sudna chislennymi metodami [Study of boat's appendages hydrodynamics by numerical methods] / Cheban E.Yu., Martemianova O.V., Kozhevnikov A.I., Mol'kov A.A. // Nauchnye problemy vodnogo transporta. – 2022. – № 72. – S. 54-69. – DOI 10.37890/jwt.vi72.272. – EDN HMNXXN.
3. Experimental study of turbulent-wake expansion from a surface ship Ermakov S.A., Kapustin I.A. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2010. T. 46. № 4. С. 524-529
4. Issledovanie vliyaniya rezhima raboty GES na pereraspredelenie fitoplanktona v verhnem vodnom sloe priplotinnogo uchastka Gor'kovskogo vodohranilisha [A study of the effect of hydropower operation regime on the redistribution of phytoplankton in the upper water layer in the dam section of the Gorki reservoir] / Dobrokhotoва

- D.V., Kapustin I.A., Mol'kov A.A., Leshchev G.V. // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2023. T. 20. № 1. S. 242-252
5. *Naturnye podsputnikovye nablyudeniya konvergentnykh techeniy v pripoveryhnostnom sloe poi h pennym obrazam* [Field observations of convergent currents in the near-surface layer of water using foam patterns in quasi-synchronous satellite optical images] / Kapustin I.A., Vostryakova D.V., Molkov A.A., Danilicheva O.A., Leshchev G.V.1, Ermakov S.A. // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2021. T. 18. № 1. S. 188-196.
 6. Alberto Ribotti, Mireno Borghini, Andrea Satta, Paolo Magni. Ship-Mounted Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP): Characteristics and Field Applications to Measure Coastal Hydrodynamics *Encyclopedia of Water* 10.1002/9781119300762.wsts0084 2019, p. 1-11
 7. Li, C.; Boswell, K.M. Estimating Water Transport from Short-Term Vessel-Based and Long-Term Bottom-Mounted Acoustic Doppler Current Profiler Measurements in an Arctic Lagoon Connected to the Beaufort Sea. *Sensors* 2022, 22, 68. <https://doi.org/10.3390/s22010068>
 8. Vojtkunskij Ja.I., Faddeev Ju.I., Fedjaevskij K.K., *Gidromehanika: Uchebnik. [Hydromechanics: Textbook] – 2-e izd., pererab. i dop. – L.: Sudostroenie, 1982. – 456 s., il.*
 9. *Spravochnik po teorii korablja : V trjyoh tomah. Tom 1. Hidromehanika. Soprotivlenie dvizheniju sudov. Sudovye dvizhiteli* [Handbook of Ship Theory: In three volumes. Volume 1. Hydromechanics. Resistance to the movement of ships. Ship propulsion systems]/Pod red. Ja.I. Vojtkunskogo. – L.: Sudostroenie, 1985. – 768 s., il.
 10. Pavlenko G.E. *Soprotivlenie vody dvizheniju sudov* [Water resistance to ship movement]. — M: Morskoy transport, 1956. — 507 s.
 11. Van-Dajk M. *Al'bom techenij zhidkosti i gaza. [Album of liquid and gas flows]: - M.: Mir, 1986. -184 s.*
 12. Dong, R., Katz, J., & Huang, T. (1997). On the structure of bow waves on a ship model. *Journal of Fluid Mechanics*, 346, 77-115. doi:10.1017/S0022112097005946 [<https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid-mechanics/article/abs/on-the-structure-of-bow-waves-on-a-ship-model/DED99D70A407568AF896AC439FBA187C? 01.11.2023>]
 13. Gary I. Roth, Daniel T. Mascenik, Joseph Katz; Measurements of the flow structure and turbulence within a ship bow wave. *Physics of Fluids* 11 November 1999; 11 (11): 3512–3523. <https://doi.org/10.1063/1.870209>
 14. Olivieri, A., Pistani, F. & Mascio, A. Breaking wave at the bow of a fast displacement ship model. *J Mar Sci Technol* 8, 68–75 (2003). <https://doi.org/10.1007/s00773-003-0155-5>
 15. Razgallah I, Kaidi S, Smaoui H, Sergeant P. Experimental Study of the Impact of Drift, Depth, and Lateral Restrictions on Inland Ship-Induced Waves under Small and Moderate Ship Speeds. *Civil Eng Res J*. 2021; 11(4): 555818. DOI: 10.19080/CERJ.2021.11.555818
 16. Fontaine, E., Faltinsen, O., & Cointe, R. (2000). New insight into the generation of ship bow waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 421, 15-38. doi:10.1017/S0022112000001397
 17. *Ocenka gidrodinamicheskogo vozdeystviya sudna na vodny ob'ekt s ispol'zovaniem ghislennykh metodov* [Assessment of the hydrodynamic impact of a vessel on a water body using numerical methods] / Lukina E.A., Cheban E.Yu., Glukhova V.S. // *Проблемы экологии Волжского бассейна : Труды 6-й всероссийской научной конференции, Нижний Новгород, 24–25 ноября 2021 года. Том Выпуск 4. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2021. – С. 19. – EDN TYEIAT.*
 18. *Issledovanie volnoobrazovaniya bol'shegruznogo katamarana dlya vnutrennih vodnykh putey chislennymi metodamy* [Study of wave formation of a large cargo catamaran for inland waterways by numerical methods] / Cheban E.Yu., Lukina E.A., Mitroshin S.G., Martemianova O.V., Nikushchenko D.V. // *Morskie intellektual'nye tehnologii. – 2023. – № 3-1(61). – S. 210-219. – DOI 10.37220/MIT.2023.61.3.021. – EDN PERDQG.*

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

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, 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, 603905, Nizhny Novgorod, Nesterova 5, e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Лукина Евгения Александровна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 603905, Нижний Новгород, Нестерова 5, e-mail: evair@yandex.ru

Кожевников Артур Игоревич, аспирант кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: notlonkot@yandex.ru

Капустин Иван Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 603905, Нижний Новгород, Нестерова, 5.

Заместитель заведующего отделом радиофизических методов в гидрофизике Института прикладной физики РАН (ИПФ РАН), 603950, Нижний Новгород, Ульянова, 46, e-mail: kapustin-i@yandex.ru

Никущенко Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры Прикладной математики и математического моделирования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, 190121, e-mail: Ndmityr@list.ru

Evgeniya A. Lukina, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of Department of Hydrodynamics, Ship Theory and Environment Safety of Ships Volga State University of Water Transport, 603905, Nizhny Novgorod, Nesterova 5, e-mail: evair@yandex.ru

Artur I. Kozhevnikov, post graduate student Hydrodynamics, Department of Hydrodynamics, Ship Theory and Environment Safety of Ships, Volga State University of Water Transport 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5, e-mail: notlonkot@yandex.ru

Ivan A. Kapustin, PhD (Phys & Math), Senior Researcher of Department of Hydrodynamics, Ship Theory and Environmental Safety of Ships, Volga State University of Water Transport, 603905, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5.

Deputy Head of the Department of Radiophysical Methods in Hydrophysics, Institute of Applied Physics RAS (IPF RAS), 603950, Nizhny Novgorod, Ulyanova, 46, e-mail: kapustin-i@yandex.ru

Dmitry V. Nikushchenko, Dr. Sci. (Eng), professor of department of applied mathematics and mathematical modelling, St. Petersburg state marine technical university, Lotsmanskaya st., 3, St. Petersburg 190121, e-mail: Ndmityr@list.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 08.02.2024

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.02.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 25.02.2024.

Научная статья

УДК 629.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.035>

Комплекс моделей стратегического управления Северным морским путем и транспортной инфраструктурой Российской Арктики

Малыгин И.Г.¹ malygin_com@mail.ru, Цыганов В.В.¹ tsyganov_v_v@mail.ru

¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. Охарактеризованы теоретические и методологические основы, методы, технологии и составляющие комплекса моделей стратегического управления развитием Северного морского пути и транспортной инфраструктуры Российской Арктики (далее - КМ) в целом. В рамках КМ разработаны 5 функциональных комплексов моделей (ФКМ), позволяющих моделировать и поддерживать практические процессы: управления стратегическим развитием Северного морского пути (СМП) и арктической транспортной инфраструктуры (АТИ) социально-экономической системы (СЭС) Арктической зоны Российской Федерации (АЗ РФ); отбора и экспертизы крупномасштабных проектов развития СМП и АТИ; обучения и адаптации СМП и АТИ; формирования транспортных коридоров; обеспечения безопасности СМП и АТИ. Сформулированы выводы, что применение КМ для управления стратегическим развитием СМП и АТИ содействует повышению уровня жизни населения АЗ РФ, эффективности реального сектора экономики и безопасности России в настоящем и в будущем.

Ключевые слова: комплекс моделей, Северный морской путь, транспортная инфраструктура, стратегическое управление, моделирование, когнитивные карты, безопасность.

Финансирование: работа выполнена в рамках исполнения государственного задания ИПТ РАН № 075-00602-24-0 на 2024 год и на плановый период 2025 и 2026 годов за счет средств предоставленной Минобрнауки России субсидии (соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 18.01.2024 №075-03-2024-666)

Для цитирования: Малыгин И.Г., Цыганов В.В. Комплекс моделей стратегического управления Северным морским путем и транспортной инфраструктурой российской Арктики // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1, С. 292—300. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.035

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.035>

A complex of models for strategic management of the Northern Sea Route and transport infrastructure of the Russian Arctic

Igor G. Malygin¹ malygin_com@mail.ru, Vladimir V. Tsyganov¹ tsyganov_v_v@mail.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences

Abstract. The theoretical and methodological foundations, methods, technologies and components of the complex of strategic management models for the development of the Northern Sea Route and the transport infrastructure of the Russian Arctic as a whole are characterized. Within the framework of the CM, 5 functional model complexes (FCM) have been developed that allow modeling and supporting practical processes: management of the strategic development of the Northern Sea Route (NSR) and the Arctic transport infrastructure (ATI) of the socio-economic system (SES) of the Arctic zone of the Russian Federation (AZ RF); selection and examination of large-scale development projects of the NSR and ATI; training and adaptation of the NSR and ATI; formation of transport corridors; ensuring the safety of the NSR and ATI. The conclusions are formulated that the use of KM to manage the strategic development of the NSR and ATI contributes to improving the standard of living of the population of the AZ of the Russian Federation, the efficiency of the real sector of the economy and the security of Russia in the present and in the future.

Keywords: a complex of models, the Northern Sea Route, transport infrastructure, strategic management, modeling, cognitive maps, security.

Financial Support: the work was carried out as part of the execution of the state task of the IPT RAS № 075-00602-24-0 for 2024 and for the planned period of 2025 and 2026 at the expense of the 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 18 January 2024 № 075-03-2024-666)

For citation: Igor G. Malygin, Vladimir V. Tsyganov A complex of models for strategic management of the Northern Sea Route and transport infrastructure of the Russian Arctic // Marine Intelligent Technologies. 2024. № 1 part 1, P. 292—300. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.035

Введение

Стратегическое развитие Российской Арктики невозможно без опережающего развития Северного морского пути (СМП) и арктической транспортной

инфраструктуры (АТИ) в целом. Масштаб и количество связей СМП и АТИ, скорость изменений делает все менее эффективным традиционное управление этими крупномасштабными транспортными системами на уровне здравого

смысла. Возникает потребность в научном обосновании принимаемых решений. При этом методы, разработанные в СССР для централизованного планирования развития СМП и АТИ, непригодны в условиях рынка. Это обусловило актуальность разработки Комплекса моделей для управления стратегическим развитием СМП и АТИ (кратко – КМ), направленного на повышение эффективности реального сектора экономики, социально-экономическое и пространственное развитие России.

Теоретические и методологические основы построения Комплекса моделей

Основные принципы построения КМ – согласованность, системность, адаптивность, прогрессивность и интеллектуальность.

Первый принцип разработки КМ – согласованность с нормативными документами стратегического планирования России (в частности, [1-4]) и существующей практикой управления стратегическим развитием СМП и АТИ. Разработка и функционирование КМ исходит из необходимости формирования единого транспортного пространства РФ [5]. Большое влияние на разработку КМ оказал мегапроект «Единая Евразия: Транс-Евразийский пояс развития (ТЕПР) – Интегральная Евразийская транспортная система (ИЕТС)» [6], инфраструктурные аспекты которого были исследованы в [7, 8].

Принцип системности при разработке КМ иллюстрирует сетевая модель (см. рис. 1) [9]. В этой модели учитываются подсистемы и системы, влияющие на стратегическое управление развитием СМП и АТИ. Например, социально-экономическая система субъекта РФ (СЭС-С) включает реальный сектор экономики (РСЭ, см. рис. 1).



Рис. 1. Сетевая модель систем, влияющих на развитие СМП и АТИ

В свою очередь, РСЭ включает производственно-транспортную систему (ПТС). Соответственно, на эффективность РСЭ влияет эффективность его ПТС. Таким образом, при управлении развитием СМП и АТИ СЭС необходимо учитывать его влияние на эволюцию транспортного комплекса (ТК), ПТС, РСЭ, СЭС-С, социально-экономической системы РФ (СЭС-Р) и глобальной социально-экономической системы (ГСЭС).

Принцип адаптивности предполагает учет угроз, прогнозов и стратегических планов устойчивого функционирования экономического комплекса РФ [10] для наиболее эффективного использования потенциала изменений при развитии СМП и АТИ. Прогрессивность КМ предполагает использование

инновационных методов и технологий при создании и функционировании СМП и АТИ.

Эффективность, безопасность и устойчивость функционирования СМП и АТИ в условиях изменений должны быть основаны на обучении и самоорганизации.

Соответственно, интеллектуальность КМ обеспечивается сочетанием подходов и методов естественного и искусственного интеллекта (в том числе математического и когнитивного моделирования, а также машинного обучения и распознавания образов) для управления развитием СМП и АТИ.

Фундаментальная основа разработки КМ на указанных принципах – теория больших транспортных систем (БТС) [11]. Теория БТС развивалась на основе теории эволюции организационных систем [12] (в которой объектом управления является рациональный обучаемый человек) и теории гуманитарных систем [13] (в которой объектом управления является человек с его эмоциональным интеллектом). Генезис и направления развития теории БТС иллюстрирует рисунок 2.

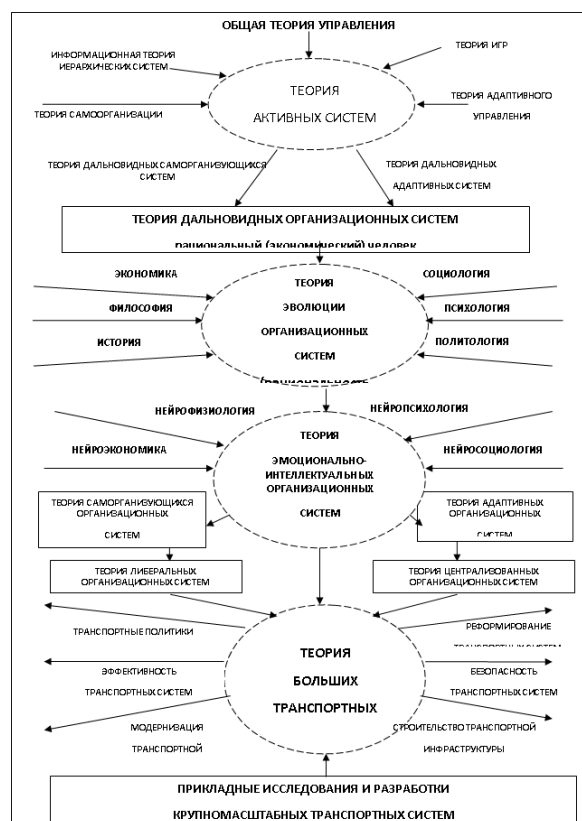


Рис. 2. Генезис и направления теории БТС и развития СМП, и АТИ

Комбинирование и согласование математических, формально-логических и когнитивных моделей КМ, разработанных на базе теории БТС, осуществляется с помощью системного инжиниринга – системотехники [14]. Прикладные разработки КМ базируются на концепции Прогрессивного Регионального Отраслевого Комплекса Согласованного Интеллектуального Механизма с Адаптацией (ПРОКСИМА) [11,12]. В её основе лежат вышеуказанные принципы и теория БТС.

На основе вышеуказанных принципов, в течение ряда лет, проводился цикл фундаментальных

исследований и прикладных разработок КМ (см. рис. 3).

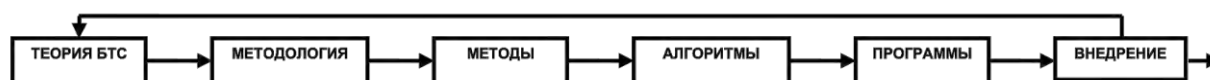


Рис. 3. Цикл фундаментальных исследований и прикладных разработок КМ

Этот цикл включает исследования в области теории БТС, а также разработку методологии, методов, алгоритмов и программ управления развитием СМП и АТИ. При этом СМП и АТИ моделируется как подсистема более сложных систем – производственных, экономических, социальных, экологических (см. рис. 1).

Структура комплекса моделей

В рамках КМ разработаны 5 функциональных комплексов моделей (ФКМ), позволяющих моделировать и поддерживать практические процессы: управления стратегическим развитием СМП и АТИ социально-экономической системы (СЭС) Арктической зоны Российской Федерации (АЗ РФ); отбора и экспертизы крупномасштабных проектов развития СМП и АТИ; обучения и адаптации СМП и АТИ; формирования транспортных коридоров; обеспечения безопасности СМП и АТИ (см. рис. 4).

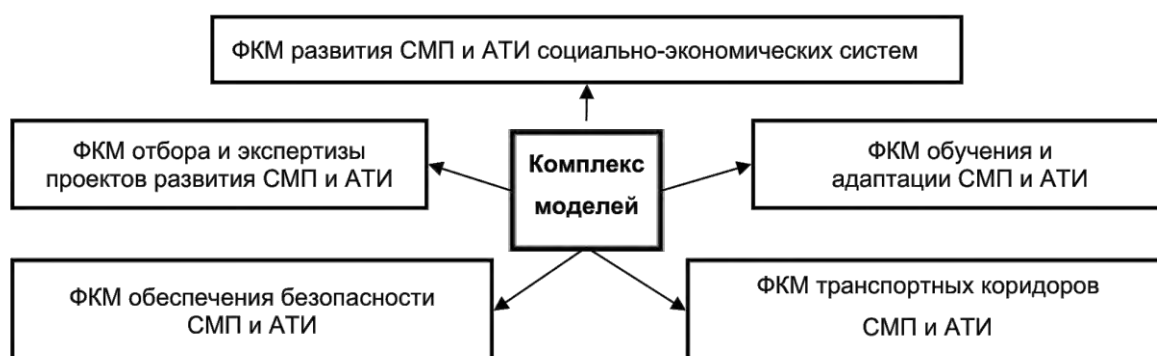


Рис. 4. Структура Комплекса моделей стратегического управления развитием СМП и АТИ

Функциональные комплексы моделей

ФКМ СМП и АТИ социально-экономической системы

ФКМ СМП и АТИ социально-экономической системы АЗ РФ содержит 2 блока моделей, позволяющих решать прямую и обратную задачи развития СМП и АТИ. Прямая задача заключается в формировании СМП и АТИ, обеспечивающей заданные (прогнозные или плановые) потребности СЭС в транспортных услугах. Обратная задача состоит в определении влияния эволюции СМП и АТИ на развитие СЭС. Первый блок моделей решает прямую задачу, используя модельно-инструментальный комплекс (МИК), включающий математическую модель, технологию и программно-информационное обеспечение сценарного моделирования развития СМП и АТИ, как подсистемы транспортного комплекса крупномасштабной СЭС [15]. Карта на рисунке 5 иллюстрирует результаты расчета такого показателя СМП и АТИ, как сравнительная обеспеченность автодорожной инфраструктурой регионов РФ, прилегающих к АЗ РФ [16].

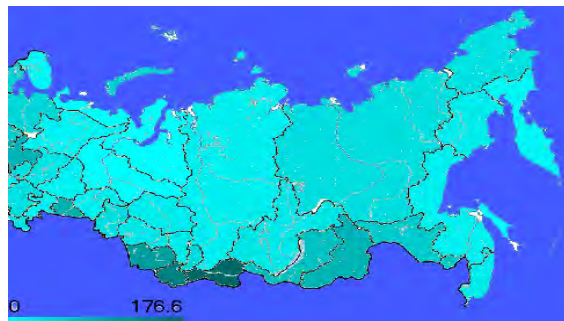


Рис. 5. Показатели обеспеченности регионов РФ автодорожной инфраструктурой

На рисунке 6 представлена блок-схема компьютерной модели, используемой в модельно-инструментальном комплексе (МИК) для сценарного прогнозирования и стратегического планирования СМП и АТИ, как подсистемы СЭС. Подобная модель и МИК использовался до 2020 года в холдинге «РЖД» для долгосрочного прогнозирования и стратегического планирования развития железных дорог РФ [15].



Рис. 6. Блок-схема компьютерной модели СМП и АТИ СЭС в МИК

Второй блок моделей ФКМ СМП и АТИ СЭС решает обратную задачу, моделируя влияние СМП и АТИ и множества других факторов на эволюцию СЭС с помощью иерархии когнитивных карт [17]. Адаптированные версии МИК и моделей влияния СМП и АТИ на СЭС использовались при разработке сценариев и прогнозов развития СМП и АТИ на период до 2025г., до 2035г. и до 2050 года [7,8].

ФКМ отбора и экспертизы проектов развития СМП и АТИ

ФКМ отбора и экспертизы крупномасштабных проектов развития СМП и АТИ содержит 4 блока

моделей. Первый блок позволяет, на основе анализа целей стратегического развития СМП и АТИ, формировать систему комплексного оценивания, ранжирования и отбора приоритетных проектов СМП и АТИ, обеспечивающую их рациональное бюджетирование [18].

Второй блок моделей поддерживает экспертизу крупномасштабных проектов развития СМП и АТИ. На его основе, в частности, разработана и утверждена Методика проведения технологического аудита проектов развития железных дорог, обязательная для компаний, организаций и предприятий холдинга «РЖД» [11]. На основе этих моделей разработан комплекс механизмов управления развитием отбора и экспертизы проектов развития и управления транспортной инфраструктурой (ТИ) [19].

Третий блок моделей позволяет проводить экспертизу влияния крупномасштабных проектов развития СМП, АТИ и производственно-транспортных систем на развитие СЭС региона, основываясь на построении и использовании когнитивных карт, описывающих взаимосвязи проектов и других факторов [20]. На рисунке 7 показана когнитивная карта, используемая для комплексной оценки влияния инфраструктурных проектов на социально-экономическое развитие Арктического региона.

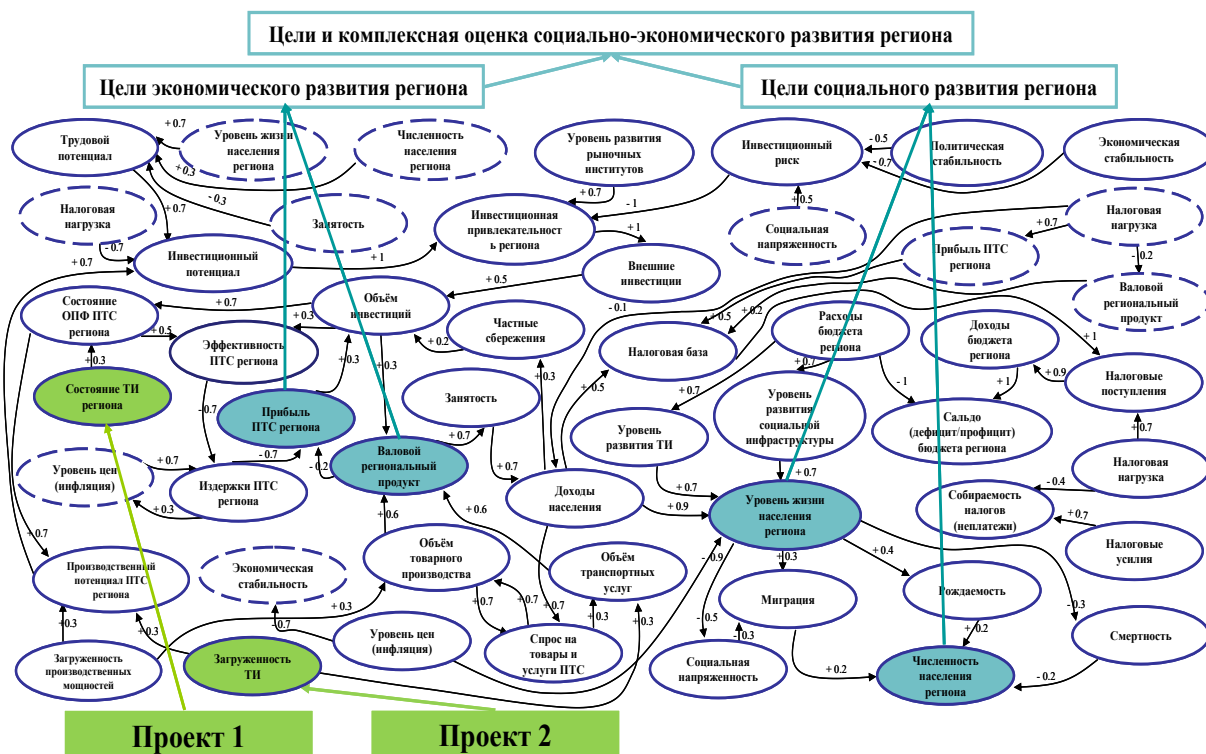


Рис. 7. Когнитивная карта комплексной оценки влияния проектов СМП и АТИ на социально-экономическое развитие Арктического региона

ФКМ обучения и адаптации СМП и АТИ

ФКМ обучения и адаптации включает 2 блока моделей приспособления СМП и АТИ к изменениям. Первый блок моделей включает модели управления крупномасштабной СМП и АТИ на основе теории игр, машинного обучения, распознавания образов,

адаптивной идентификации [9], предназначенные для использования в интеллектуальной мультимодальной транспортной системе России (ИМТС) [21-23]. Например, исследование дорожных игр в крупномасштабных транспортных системах [24] показало возможности увеличения пропускных способностей транспортных коридоров.

Второй блок моделей включает модели совершенствования управления СМП и АТИ с использованием новых технологий, путем реструктуризации крупномасштабных транспортных сетей на полигоны [11]. Эти модели применимы как на стадиях формирования системы управления СМП и АТИ, так и на этапе эксплуатации СМП и АТИ. В частности, разработана модель согласования границ полигонов управления для разных подсистем СМП и АТИ (терминально-логистических, информационно-телекоммуникационных, энергетических, ремонтных и др.). На рисунке 8 показаны графики, иллюстрирующие зависимость оптимального числа центров управления СМП и АТИ от сложности управления.

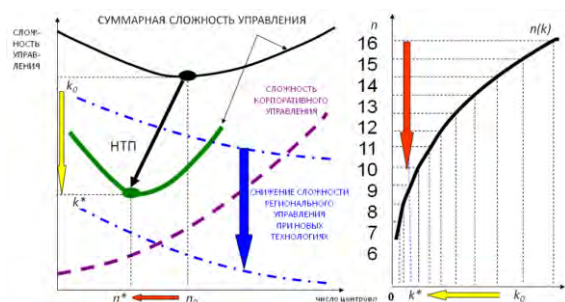


Рис. 8. Зависимость оптимального числа центров управления СМП и АТИ от сложности управления

Доказано, что их число уменьшается при снижении сложности регионального управления СМП и АТИ в результате инноваций.

ФКМ безопасности СМП и АТИ

ФКМ безопасности СМП и АТИ включает модели систем транспортной безопасности, основанные на инструментах искусственного интеллекта (машинном обучении, распознавании образов, адаптивной идентификации), а также на когнитивном подходе. Его использование позволило разработать методы, технологии и руководящие технические материалы в сфере мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера [25-27].

Разработаны предложения по разработке Интеллектуальной системы управления экологической безопасностью (ИСЭБ) Северного морского пути [28], разработана структура ИСЭБ СМП [29], концепция развития ИСЭБ СМП [30]. Данный проект продвигается в рамках деятельности Арктического кластера Санкт-Петербурга при поддержке Комитета Санкт-Петербурга по делам Арктики, что подтверждает актуальность продолжения расширения структуры Интеллектуальной системы экологической безопасности (ИСЭБ) в рамках АЗ РФ и Северного морского пути (СМП) в частности. Указанные исследования отвечают потребности в учете прогнозируемых изменений в экологической обстановке данного региона, особенно в свете увеличивающейся экономической значимости СМП для торгового товарооборота Российской

Федерации. Предложенная структура ИСЭБ СМП обеспечивает наиболее полное выполнение поставленных перед ней задач. Главным результатом деятельности ИСЭБ является анализ и интерпретация данных с целью определения экологического состояния и потенциальных угроз. Однако, развитие прогностических элементов ИСЭБ, как задумано авторами [28-30], будет способствовать более точному определению стратегий развития СМП, с акцентом на сохранении уникальных экологических систем данного региона, при этом не ущемляя его экономическую эффективность.

ФКМ транспортных коридоров

ФКМ транспортных коридоров включает сетевые модели формирования СМП и АТИ на основе международных транспортных коридоров (МТК), ориентированные на обеспечение равной транспортной и инвестиционной привлекательности этих МТК [7]. В их основе лежит теория самоорганизации центров капитала [12] на рынке транспортных услуг. Такими центрами капитала на перспективном рынке транзитных транспортных услуг призваны стать МТК, соединяющие Азиатско-Тихоокеанский регион и ЕС [9]. Один из таких МТК – это Арктический интеллектуальный мультимодальный транспортный коридор (АИМТК), создаваемый на базе СМП и АТИ (см. рис. 9). На повышение привлекательности АИМТК для перевозчиков и потребителей транспортных услуг (кратко – транспортной привлекательности АИМТК) направляются значительные инвестиции. Это делает АИМТК точкой роста в АЗ РФ, а также мультипликатором инвестиций [8]. Другой пример – это железнодорожный транспортный коридор (ЖДК) на основе Транссиба и БАМа. Потенциальная транспортная и инвестиционная привлекательность ЖДК делает его второй точкой роста ТИ [9], а также мультипликатором инвестиций (см. рис. 9).

Однако наличие двух этих МТК делает их конкурентами на рынке транзитных транспортных услуг. При разной их привлекательности, транспортные потоки и сопутствующие инвестиции пойдут в более привлекательный МТК. А инвестиционно непривлекательный МТК придется поддерживать за счёт госбюджета. Во избежание этого, необходимо обеспечить одинаковую транспортную и инвестиционную привлекательность обоих МТК.

Рисунок 9 иллюстрирует построенные оптимистические сценарии и прогнозы развития СМП и АТИ регионов Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики на основе АИМТК и ЖДК на периоды до 2025, 2035 и 2050 года. Пунктиром обозначены районы формирования грузовой базы для АИМТК и ЖДК, цифрами – типы перевозимых грузов. Кроме того, разработаны пессимистические сценарии и прогнозы, связанные с усилением помех, других негативных факторов и внешних воздействий [10]. Соответствующие предложения по корректировке стратегического управления СМП и АТИ поддержаны Минтрансом и Минвостокразвития России.



Рис. 9. СМП, АТИ и ТИ Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики на основе АИМТК и ЖДК

Заключение

Стратегическое развитие Российской Арктики невозможно без опережающего развития СМП и АТИ. Ускорение изменений, масштаб, число и сложность связей СМП и АТИ делает все менее эффективным традиционный менеджмент на уровне здравого смысла. Возникает потребность в поддержке и научном обосновании принимаемых решений. Предложенный в статье КМ ориентирован на управление стратегическим развитием СМП и АТИ для социально-экономического и пространственного развития России.

Сценарии и прогнозы развития СМП и АТИ на периоды до 2025, 2035 и 2050 года, разработанные с использованием КМ, детализируют направления пространственного развития этих регионов и

повышения связности их территорий и направлены на улучшение доступности транспортных услуг для населения.

Разработанные меры стратегического управления СМП и АТИ, в условиях усиления негативных факторов природного и техногенного характера, способствуют оперативности и эффективности проведения операций подразделениями МЧС и Минобороны России в экстремальных климатических условиях, повышению экологической и техносферной безопасности.

В целом, применение КМ для управления стратегическим развитием СМП и АТИ содействует повышению уровня жизни населения АЗ РФ, эффективности реального сектора экономики и безопасности России в настоящем и в будущем.

Литература

1. О национальных целях и стратегических задачах развития РФ на период до 2024 г. Указ Президента РФ 07.05.2018г. № 204.
2. Стратегия национальной безопасности РФ. Указ Президента РФ 31.12.2015 г. № 683.
3. Стратегия развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г. Указ Президента РФ 26.10.2020 г. № 645.
4. Транспортная стратегия РФ до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г., утв. Правительством РФ 27.11.2021 г. № 3363-р.
5. Стратегия пространственного развития РФ на период до 2025 г., утв. Правительством РФ 13.02.2019 г. № 207-р.
6. Осипов Г.В., Садовничий В.А., Якунин В.И. Интегральная евразийская инфраструктурная система как приоритет национального развития страны. – М.: ИСПИ РАН, 2013. – 62 с.
7. Комплексное освоение территории РФ на основе транспортных пространственно-логистических коридоров. Актуальные проблемы реализации мегапроекта «Единая Евразия: ТЕПР – ИЕТС» / Отв. ред. академик РАН В.В. Козлов, член-корреспондент РАН А.А. Макоско; Российская академия наук. – М.: Наука, 2019. – 463 с.
8. Инфраструктура Сибири, Дальнего Востока и Арктики. Состояние и три этапа развития до 2050 года / Под ред. Макоско А. А. – СПб.: ИПТ РАН, 2019. – 468 с.
9. Малыгин И.Г., Гурлев И.В., Савушкин С. А., Макоско А.А., Мохов И.И., Еналеев А.К., Цвиркун А.Д., Цыганов В.В., Бородин В.А., Гавкалюк Б.В. Комплекс моделей для управления стратегическим развитием Северным морским путем и транспортной инфраструктуры, и Российской Арктики в условиях изменения климата. – СПб.: СПбУ ГПС МЧС России, ИПТ РАН, 2023. – 122 с.

10. Стратегическое планирование устойчивого функционирования экономического комплекса РФ. Угрозы, целеполагание, прогноз, рекомендации / Под ред. Макоско А. А. – М.: Наука, 2021. – 412 с.
11. Цыганов В.В., Малыгин И.Г., Еналеев А.К., Савушкин С.А. Большие транспортные системы: теория, методология, разработка и экспертиза. – СПб.: ИПТ РАН, 2016. – 216 с.
12. Цыганов В.В., Бородин В.А., Шишкин Г.Б. Интеллектуальное предприятие. Теория и практика управления эволюцией организации. – М.: Университетская книга, 2004. – 768 с.
13. Цыганов В.В. Адаптивные механизмы и высокие гуманитарные технологии. Теория гуманитарных систем. – М.: Академический проект, 2012. – 351с.
14. Косяков А., Свит У., Сеймур С., Бимер С. Системная инженерия. Принципы и практика. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 624 с.
15. Савушкин С.А., Цыганов В.В. Сценарии развития транспортного комплекса // Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2020. – № 1. – С. 13-18.
16. Цыганов В.В., Савушкин С.А. Региональные показатели транспортных систем и пространственное развитие // Транспорт: наука, техника, управление. – 2019. – № 7. – С. 3-11.
17. Цыганов В.В. Когнитивное прогнозирование комплексной инфраструктуры крупномасштабного региона // Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2020. – №1. – С.18-23.
18. Еналеев А.К., Цыганов В.В. Комплексное оценивание проектов транспортной инфраструктуры // Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2019. – № 4 (14). – С. 17-20.
19. Еналеев А.К., Цыганов В.В. Комплекс механизмов управления развитием транспортной инфраструктуры // Информационные технологии в науке, образовании и управлении – 2020. – № 1. – С. 23-27.
20. Цыганов В.В., Савушкин С.А. Факторы и когнитивная модель развития транспортной инфраструктуры региона // Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – №2. – 2020. – С.13-17.
21. Малыгин И.Г., Иванов А.Ю., Комашинский В.И. Концепция построения единого информационного пространства интеллектуальной мультимодальной транспортной системы // Транспорт Российской Федерации. – 2016. – №6(67). – С. 24-28.
22. Malygin I.G., Seliverstov Y.A., Seliverstov S.A. et al. Mobile Technologies in Intelligent Transportation Systems // Communications in Computer and Information Science. – 2020. – Vol. 1140. – pp 384-391.
23. Malygin I.G., Komashinsky V.I., Tsyganov V.V. International experience and multimodal intelligent transport system of Russia // Proceedings of Conf. Management of Large-Scale System Development. Moscow: IEEE, 2017. – P.1-5.
24. Цыганов В.В. Дорожные игры в крупномасштабных транспортных системах // Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2017. – № 4. – С. 37-41.
25. Malygin I.G., Komashinsky V.I., Korolev O.A. Cognitive technologies for ensuring road safety in an intelligent transport system // Transportation Research Procedia. – 2018. – Vol. 36. – P. 487-492.
26. Malygin I.G., Komashinsky V.I., Asaul M.A. The intellectual technologies on water transport // Marine intellectual technologies. – 2017. – Vol. 2, № 2(36). – P. 55-58.
27. Malygin I.G., Korolev O.A. High-speed algorithm for transmitting video information about emergency situations on transport objects // Marine intellectual technologies. – 2021. – Vol. 1, №1(51). – P. 64-70.
28. Malygin I.G., Kuznetsova E.Y. Proposals for development of intelligent environmental safety management system for the Northern Sea Route // Marine intellectual technologies. – 2022. – Vol. 1, №1(55). – P. 121-127.
29. Malygin I.G., Konovalov I.N. The structure of the intellectual system of environmental safety of the Northern Sea Route // Marine Intelligent Technologies. . – 2022. – Vol.1, № 4(58). – P. 215-221.
30. Malygin I.G., Konovalov I.N., Korolev O.A. Development of the concept of an intelligent environmental safety system of the Northern Sea Route // Marine Intelligent Technologies. – 2023. – Vol.1, № 4(62). – P. 134-142.

References

1. O nacional'nyh celyah i strategicheskikh zadachah razvitiya RF na period do 2024 g. Ukaz Prezidenta RF 07.05.2018g. № 204 [On the national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024 Decree of the President of the Russian Federation № 204 dated 05/07/2018.]
2. Strategiya nacional'noj bezopasnosti RF. Ukaz Prezidenta RF 31.12.2015 g. № 683. [The National Security Strategy of the Russian Federation. Decree of the President of the Russian Federation № 683 on December 31, 2015.]
3. Strategiya razvitiya Arkticheskoy zony RF i obespecheniya nacional'noj bezopasnosti na period do 2035 g. Ukaz Prezidenta RF 26.10.2020 g. № 645. [The strategy for the development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035. Decree of the President of the Russian Federation № 645 dated 10/26/2020.]
4. Transportnaya strategiya RF do 2030 g. s prognozom na period do 2035 g., utv. Pravitel'stvom RF 27.11.2021 g. № 3363-r. [The transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035, approved. By the Government of the Russian Federation № 3363-r on 11/27/2021.]
5. Strategiya prostranstvennogo razvitiya RF na period do 2025 g., utv. Pravitel'stvom RF 13.02.2019 g. № 207-r. [Spatial Development Strategy of the Russian Federation for the period up to 2025, approved By the Government of the Russian Federation № 207-r on 02/13/2019.]
6. Osipov G. V., Sadovnichij V. A., Yakunin V. I. Integral'naya evrazijskaya infrastruktural'naya sistema kak prioritet nacional'nogo razvitiya strany [The integrated Eurasian infrastructure system as a priority for the national development of the country]. – М.: ISPI RAS, 2013. – 62 p.
7. Comprehensive development of the territory of the Russian Federation on the basis of transport spatial and logistic corridors. Actual problems of the implementation of the megaproject "United Eurasia: NOW – IETS" [Kompleksnoe

- osvoenie territorii RF na osnove transportnyh prostranstvenno-logisticheskikh koridorov. Aktual'nye problemy realizatsii megaproekta «Edinaya Evraziya: TEPR – IETS») / Ed. Academician of the Russian Academy of Sciences V.V. Kozlov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences A.A. Makosko; Russian Academy of Sciences. – M.: Nauka, 2019. – 463 p.
8. The infrastructure of Siberia, the Far East and the Arctic. The state and three stages of development until 2050 [Infrastruktura Sibiri, Dal'nego Vostoka i Arktiki. Sostoyanie i tri etapa razvitiya do 2050 goda] / Ed. Makosko A. A. – St. Petersburg: IPT RAS, 2019. – 468 p.
9. Malygin I.G., Gurlev I.V., Savushkin S. A., Makosko A.A., Mokhov I.I., Enaleev A.K., Tsvirkun A.D., Tsyganov V.V., Borodin V.A., Gavkalyuk B.V. A set of models for managing the strategic development of the Northern Sea Route and transport infrastructure, and the Russian Arctic in the context of climate change. [Kompleks modelej dlya upravleniya strategicheskimi razvitiem Severnym morskim putem i transportnoj infrastruktury, i Rossijskoj Arktiki v usloviyah izmeneniya klimata.] – St. Petersburg: SPbU GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, IPT RAS, 2023. – 122 p.
10. Strategic planning of the sustainable functioning of the economic complex of the Russian Federation. Threats, goal-setting, forecast, recommendations [Strategicheskoe planirovanie ustojchivogo funkcionirovaniya ekonomicheskogo kompleksa RF. Ugrozy, celepolaganie, prognoz, rekomendacii] / Ed. Makosko A. A. – M.: Nauka, 2021. – 412 p.
11. Tsyganov V.V., Malygin I.G., Enaleev A.K., Savushkin S.A. Large transport systems: theory, methodology, development and expertise. [Bol'shie transportnye sistemy: teoriya, metodologiya, razrabotka i ekspertiza.] – St. Petersburg: IPT RAS, 2016. – 216 p.
12. Tsyganov V.V., Borodin V.A., Shishkin G.B. Intellectual enterprise. Theory and practice of management of the evolution of the organization. [Intellektual'noe predpriyatie. Teoriya i praktika upravleniya evolyuciej organizacii.] – M.: University Book, 2004. – 768 p.
13. Tsyganov V.V. Adaptive mechanisms and high humanitarian technologies. Theory of humanitarian systems. [Adaptivnye mekhanizmy i vysokie gumanitarnye tekhnologii. Teoriya gumanitarnykh sistem.] – M.: Academic project, 2012. – 351 p.
14. Kosyakov A., Sweet U., Seymour S., Beamer S. System engineering. Principles and practice. [Sistemnaya inzheneriya. Principy i praktika.] – M.: DMK Press, 2014. – 624 p.
15. Savushkin S.A., Tsyganov V.V. Scenarios for the development of the transport complex [Scenarii razvitiya transportnogo kompleksa] // Information technologies in science, education and management. – 2020. – № 1. – pp. 13-18.
16. Tsyganov V.V., Savushkin S.A. Regional indicators of transport systems and spatial development [Regional'nye pokazateli transportnykh sistem i prostranstvennoe razvitiye] // Transport: science, technology, management. – 2019. – № 7. – pp. 3-11.
17. Tsyganov V.V. Cognitive forecasting of complex infrastructure of a large-scale region [Kognitivnoe prognozirovaniye kompleksnoj infrastruktury krupnomasshtabnogo regiona] // Information technologies in science, education and management. – 2020. – №1. – pp.18-23.
18. Enaleev A.K., Tsyganov V.V. Integrated assessment of transport infrastructure projects [Kompleksnoe ocenivaniye proektov transportnoj infrastruktury] // Information technologies in science, education and management. – 2019. – № 4 (14). – pp. 17-20.
19. Enaleev A.K., Tsyganov V.V. Complex of mechanisms for managing the development of transport infrastructure [Kompleks mekhanizmov upravleniya razvitiem transportnoj infrastruktury] // Information technologies in science, education and management – 2020. – № 1. – pp. 23-27.
20. Tsyganov V.V., Savushkin S.A. Factors and a cognitive model of the development of the transport infrastructure of the region [Faktory i kognitivnaya model' razvitiya transportnoj infrastruktury regiona] // Information technologies in science, education and management. – № 2. – 2020. – pp.13-17.
21. Malygin I.G., Ivanov A.Yu., Komashinsky V.I. The concept of building a unified information space of an intelligent multimodal transport system [Koncepciya postroeniya edinogo informacionnogo prostranstva intellektual'noj mul'timodal'noj transportnoj sistemy] // Transport of the Russian Federation. – 2016. – №6(67). – pp. 24-28.
22. Malygin I.G., Seliverstov Y.A., Seliverstov S. A. et al. Mobile Technologies in Intelligent Transportation Systems // Communications in Computer and Information Science. – 2020. – Vol. 1140. – pp 384-391.
23. Malygin I., Komashinsky V., Tsyganov V. International experience and multimodal intelligent transport system of Russia // Proceedings of Conf. Management of Large-Scale System Development. Moscow: IEEE, 2017. – P.1-5.
24. Tsyganov V.V. Road games in large-scale transport systems [Dorozhnye igry v krupnomasshtabnykh transportnykh sistemah] // Information technologies in science, education and management. – 2017. – № 4. – pp. 37-41.
25. Malygin I.G., Komashinsky V.I., Korolev O.A. Cognitive technologies for ensuring road safety in an intelligent transport system // Transportation Research Procedia. – 2018. – Vol. 36. – pp. 487 – 492.
26. Malygin I.G., Komashinsky V.I., Asaul M.A. The intellectual technologies on water transport // Marine intellectual technologies. – 2017. – Vol. 2, № 2(36). – P. 55-58
27. Malygin I.G., Korolev O.A. High-speed algorithm for transmitting video information about emergency situations on transport objects // Marine intellectual technologies. – 2021. – Vol. 1, №1(51). – P. 64-70.
28. Malygin I.G., Kuznetsova E.Y. Proposals for development of intelligent environmental safety management system for the Northern Sea Route // Marine intellectual technologies. – 2022. – Vol. 1, №1(55). – P. 121-127.
29. Malygin I.G., Konovalov I.N. The structure of the intellectual system of environmental safety of the Northern Sea Route // Marine Intelligent Technologies. . – 2022. – Vol.1, № 4(58). – P. 215-221.
30. Malygin I.G., Konovalov I.N., Korolev O.A. Development of the concept of an intelligent environmental safety system of the Northern Sea Route // Marine Intelligent Technologies. – 2023. – Vol.1, № 4(62). – P. 134-142.

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

Малыгин Игорь Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, директор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13.; 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, e-mail: malygin_com@mail.ru

Цыганов Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: tsyganov_v_v@mail.ru

Vladimir V. Tsyganov, professor, Dr. Sci. (Eng), chief researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th Line VO, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: tsyganov_v_v@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 04.02.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 11.02.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 22.02.2024.



**Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173

190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3

e-mail: mit-journal@mail.ru http://morintex.ru

**ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ
НАУЧНОГО ЖУРНАЛА
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов:

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи в WORD и PDF, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта и инструкция размещены на сайте **www.morintex.ru**
3. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
4. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
5. Рубрикатор в WORD.

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) должны быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу **mit-journal@mail.ru** (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта <http://morintex.ru> из раздела «для авторов».

На страницах журнала публикуются НОВЫЕ научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом должен быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации 18000 рублей по выставяемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

**Главный редактор научного журнала
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ

Гайкович А.И. Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

Караев Р.Н., Разуваев В.Н., Фрумен А.И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П.А. Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**

Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Теория систем автоматического управления техническими средствами кораблей. Курс лекций – СПб.: НИЦ «Моринтех», 2022. 300 стр.

В курсе лекций рассматриваются основные вопросы теории систем автоматического управления линейных, нелинейных, импульсных, цифровых, адаптивных и оптимальных, основанный на дифференциальных уравнениях и передаточных функциях, способствующих физическому пониманию процессов, происходящих в системах автоматического управления, для дальнейшего усвоения особенностей применения матричных уравнений для исследования устойчивости и качества современных цифровых систем автоматического управления.

Есть в продаже: **цена 1800 руб. + пересылка**