

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

1101001001001000101010101010000110111000110010010110011001100010 ISSN 2073-7173 (print)
1101100110111010011010010010111001001110010101001100100110001100 ISSN 2588-0233 (on line)
0001001100110011001010011011100110010100011010100110011001010110001010010010101110100110
0001001100110011001101100111000100110010010101000011100110010011100010110100100100
001100110010000101101001010100100100001111100110011001101101011001110000001110010100101
1101100110010101111001010100101001101001110001011001010011001010111100101011100101101001010
0000111010100111100010101100100011100110110100100110110110011001010100111001010011001001100
1100110001110010011000101001010011110101010100000101010100011010111001100100011100101001001010
0010100111001101001111000101001010101110101001000010110001100110010101100010101100110100101001



№ 3 Часть 1 2023
№ 3 Part 1 2023

Morskie intelektual'nye tehnologii



01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
010100011011101001000100111011000010110011101010011101001100010101011010100011001110
1101011000010101111010010100110110101100010110101011010010100111010101 101001
1001101001101111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 101
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 011





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

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 3 часть 1 2023 Сквозной номер 61

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

О НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

На страницах журнала публикуются **новые** научные разработки, результаты исследований, методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления.

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

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

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

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта www.morintex.ru из раздела «для авторов». Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2014 год и с № 3(25) 2014 полные выпуски размещены на сайте журнала <http://morintex.ru> в открытом доступе. Стоимость публикации 14400 рублей. Стоимость публикации включает: публикацию в журнале, электронное издание журнала, размещение в научной электронной библиотеке E-library, в Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI) и в Ulrich's Knowledgebase. Для аспирантов публикации бесплатно, если аспирант единственный автор.

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

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

Рубрики журнала

Проектирование и конструкция судов;

Теория корабля и строительная механика;

Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства;

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

Информационно-измерительные и управляющие системы;

Системный анализ, управление и обработка информации;

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;

Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования;

Математическое моделирование и численные методы.

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

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

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

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

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

Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

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

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

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

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

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова

© ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ», 2023



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

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 3 part 1 2023 www.morintex.ru
Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

ABOUT SCIENTIFIC JOURNAL «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Frequency of publication - 4 issues per year.

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

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

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

Journal headings:

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

The journal is coming since 2008

Publication frequency — 4 issues per year

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

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

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

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

Member of Association of science editors and publishers.

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

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

e-mail: mit-journal@mail.ru

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

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

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

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

Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova

© RESEARCH CENTRE «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES» Ltd, 2023



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

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

www.morintex.ru

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор:

Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

**Редакционная коллегия
Заместители главного редактора**

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

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

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

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

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

Члены Редколлегии

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

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

Военно-морской академии, Калининград

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

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

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

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

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

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

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

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

**Редакционный Совет
Сопредседатели**

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

Члены Совета

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

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

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

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

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

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



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

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor

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

Editorial Staff Deputy Chief Editors

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

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

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

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

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

Members of Editorial Staff

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Board Co-chairmen

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

Council Members

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

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

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

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

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

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

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

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

- **Дмитрий Алексеевич Скороходов**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Олег Николаевич Петров**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Александрович Родионов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Анастасия Валерьевна Ткачева**, кандидат физ. – мат. наук, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН
- **Владимир Александрович Рыжов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Иван Иванович Костылев**, доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Александр Алексеевич Таранцев**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Галина Валентиновна Герман**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Иосифович Гайкович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Николай Васильевич Никитин**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Елена Борисовна Амбросовская**, кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” В.И.Ульянова (Ленина)
- **Андрей Владимирович Февральских**, кандидат технических наук, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
- **Юрий Александрович Власов**, кандидат физико-математических наук
- **Геннадий Петрович Кича**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Алексей Леонидович Стариченков**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
- **Владимир Борисович Мелехин**, доктор технических наук, профессор, профессор Дагестанский государственный технический университет
- **Сергей Владимирович Вербицкий**, кандидат технических наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Сергей Владимирович Антоненко**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет
- **Борис Петрович Ионов**, доктор технических наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Николай Николаевич Семенов**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Борис Федорович Дмитриев**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

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

- **Dmitriy A. Skorohodov**, Dr.Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Oleg N. Petrov**, Ph.D. (Eng), associate professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Alexander A. Rodionov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Anastasiia V. Tkacheva**, Ph.D. (Phys & Math), Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy, Far East Branch, Russian Academy of Sciences
- **Vladimir A. Ryzhov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Ivan I. Kostylev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Alexander A. Tarantsev**, Dr.Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Galina V. German**, Dr. Sci. (Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Aleksandr I. Gaikovich**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Nikolai V. Nikitin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Elena B. Ambrosovskaya**, Ph.D. (Eng), Associate Professor, St. Petersburg State Electrotechnical University (LETI)
- **Andrey V. Fevral'skikh**, Ph.D. (Eng), Moscow Aviation Institute (national research university)
- **Jurij A. Vlasov**, PhD (Phys & Math)
- **Gennadiy P. Kicha**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Maritime State University named Admural G. I. Nevel'skoy
- **Alexey L. Starichenkov**, Dr. Sci. (Eng), professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
- **Vladimir B. Melekhin**, Dr. Sci. (Eng), professor, Dagestan State Technical University
- **Sergej V. Verbickij**, Ph.D. (Eng), associate professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Sergey V. Antonenko**, Dr. Sci. (Eng), professor, Far Eastern Federal University
- **Boris P. Ionov**, Dr. Sci. (Eng), St. Petersburg State Marine Technical University
- **Nikolai N. Semenov**, Ph.D. (Eng), associate professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Boris F. Dmitriev**, Dr. Sci. (Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg

СОДЕРЖАНИЕ	стр.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ	
Дергилев В.А., Жук С.С., Аванесова Т.П. Анализ экономической целесообразности использования концепции системы автономного судовождения в порту.....	11
Калашников П.К., Фокина А.А., Самарин И.В., Першин Н.В., Макуренкова Н.С. Выбор системы хранения груза при перевозке сжиженного природного газа речным транспортом.....	17
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Козин В.М., Верещагин В.Ю. Зависимость напряженно-деформированного состояния заснеженного ледяного покрова от глубины воды в условиях изгибно-гравитационного резонанса...	26
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Кузнецов Ю.П., Хрунков С.Н., Чуваков А.Б., Погодин Р.А. Разработка турбопривода для быстроходных ручных шлифовальных пневматических машин повышенной мощности.....	36
СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Тория Т.Г., Епихин А.И., Хекерт Е.В., Модина М.А., Козенкова Г.Л. Работа судового двигателя внутреннего сгорания по замкнутому циклу с использованием электролизера.....	43
Пассар А.В., Фершалов Ю.Я. Расчётные характеристики радиально-осевых турбин.....	51
Дологлонян А.В., Матвеев В.Т., Клименко А.Г. Управление генерацией теплоты в когенерационных газотурбинных установках с регенерацией на частичных нагрузках при различных способах нагружения.....	59
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ	
Скорород Б.А., Жилияков П.В. Устойчивость системы наведения автономных подводных аппаратов в присутствии подводных течений.....	70
Фатеев А.Е., Скварник И.С., Перспективы применения цифровых систем связи IoT в системе управления движением судов.....	79
Амбросовская Е.Б., Амбросовский В.М., Ромаев Д.В. Математические модели в отладочных стендах для судовых систем управления.....	89
Багницкий А.В., Инзарцев А.В., Панин М.А. Алгоритмическое обеспечение работы АНПА подо льдом в приполярных районах.....	98
Васьков А.С., Мироненко А.А. Методы планирования ограждения опасностей для контроля в системах управления движением судна.....	110
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ	
Каминский В.Ю., Скорородов Д.А. Перспективы подводной транспортировки отработавшего ядерного топлива.....	120
Астреин В. В., Филатов В. И. Навигационные системы и методы повышения их надежности и точности для решения задач предупреждения столкновений автономного судна на этапе разработки концепции.....	131
Егоров С.Б., Горбачев Р.И. Вероятностный анализ непрерывной работы пассивных обнаружителей движущихся источников шумоизлучения.....	145
Малыгин И.Г., Фахми Ш.С., Королев О.А. Экологическая безопасность: современные технологии обнаружения аварийных разливов нефтепродуктов на морской поверхности.....	155
Каминский В.Ю., Скорородов Д.А., Васьков В.В. Теоретические основы оптимального наблюдения параметров работы объектов инфраструктуры Арктического региона и Северного морского пути.....	163

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И
ПРОИЗВОДСТВАМИ**

Кожевин Д.Ф., Таранцев А.А., Естехин В.Г., Коновалов И.Н. Анализ нормативных требований к огнетушителям, размещаемым на судах.....	170
Жук А.С. Итеративный метод планирования движения судна в непредсказуемой навигационной обстановке.....	179

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

Ткачева А.В., Абашкин Е.Е. Воздействие предварительного подогрева кромки пластины из стали 30ХГСА на распределение остаточных напряжений при электродуговом процессе.....	188
Альбаев Д.А., Фахурдинов Р.Р. Вычисление гидродинамических коэффициентов присоединённых масс и демпфирования при колебаниях шпангоутного контура численными методами.....	200
Чебан Е.Ю., Лукина Е.А., Митрошин С.Г., Мартемьянова О.В., Никущенко Д.В. Исследование волнообразования большегрузного катамарана для внутренних водных путей численными методами.....	210

CONTENTS	page
DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS	
Viktor A. Dergilev, Sergey S. Zhuk, Tatyana P. Avanesova Analysis of the economic feasibility of using the concept of the autonomous navigation system in the port.....	11
Pavel K. Kalashnikov, Anastasia A. Fokina, Ilya V. Samarin, Natalya S. Makurenkova Choice of a cargo storage system for the transportation of liquefied natural gas by river transport.....	17
THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS	
Victor M. Kozin, Vladislav Yu. Vereshchagin Dependence of the stress-strain state of the snow-covered ice cover on the water depth under conditions of flexural-gravitational resonance.....	26
TECHNOLOGY OF SHIP BUILDING. SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Yuriy P. Kuznetsov, Sergey N. Khrunkov, Aleksandr B. Chuvakov, Roman A. Pogodin Development of a turbine drive for high-speed manual pneumatic grinding tools of increased power.....	36
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Teodor G. Toriia, Aleksey I. Epikhin, Evgeniy V. Khekert, Marina A. Modina, Galina L. Kozenkova Operation of a marine internal combustion engine in a closed cycle using an electrolyzer.....	43
Andrey V. Passar, Yuriy Ya. Fershalov Design characteristics of radial-axial turbines.....	51
Andrey V. Dologlonyan, Valeriy T. Matviienko Alexandr G. Klimenko Control of heat generation in cogeneration gas turbine plants with regeneration at partial loads under various loading modes.....	59
INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS	
Boris A. Skorohod, Pavel V. Zhilyakov Stability of the guidance system of autonomous underwater vehicles in the presence of underwater currents.....	70
Artyom E. Fateev, Igor S. Skvarnik Prospects for the application of digital communication systems IoT in ship traffic control systems.....	79
Elena B. Ambrosovskaya, Victor M. Ambrosovsky, Dmitry V. Romaev Mathematical models in ship control systems testbench.....	89
Andrey V. Bagnitckii, Alexander V. Inzartsev, Mikhail A. Panin Algorithmic support for the AUVs operation under ice in the polar regions.....	98
Anatoliy S. Vas'kov, Aleksandr A. Mironenko The methods for planning no-go area clearing lines in the vessel's control systems.....	110
SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING	
Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov Prospects for underwater transportation of spent nuclear fuel.....	120
Vadim V. Astrein, Viktor I. Filatov Navigation systems and methods for improving their reliability and accuracy to solve problems of collision avoidance of an autonomous ship at the stage of concept development.....	131
Stanislav B. Egorov, Roman I. Gorbachev Probabilistic analysis of continuous operation of passive detectors of moving noise sources.....	145
Igor G. Malygin, Shakeeb S. Fahmi, Oleg A. Korolev. Environmental safety: modern technologies for detecting accidental oil spills on the sea surface.....	155
Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov, Viktor V. Vaskov The theoretical foundations of the infrastructure of the Arctic region and the Northern Sea Route.....	163
AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS	
Dmitry F. Kozhevin, Alexander A. Tarantsev, Vitalii G. Estekhin, Ivan N. Konovalov Analysis of regulatory requirements for fire extinguishers placed on ships.....	170
Alexander S. Zhuk Iterative method for ship motion planning in unpredictable navigational environment...	179

MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Anastasia V. Tkacheva, Evgeny E. Abashkin The effect of preheating the edge of a plate made of steel 30khgsa on the distribution of residual stresses in the electric arc process.....	188
Danil A. Al'baev, Renat R. Fahurdinov Determination of hydrodynamic coefficients of the added masses and damping due to motions of the frame contour by computational methods.....	200
Egor Yu. Cheban, Evgeniya A. Lukina, Sergey G. Mitroshin, Olga V. Martemianova, Dmitry. V. Nikushchenko Study of wave formation of a large cargo catamaran for Inland waterways by numerical methods.....	210

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS

Научная статья

УДК 338.47

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.001>

Анализ экономической целесообразности использования концепции системы автономного судовождения в порту

В.А. Дергилев¹ viktor315464@mail.ru, С.С. Жук¹ sezh.zhuk.99@mail.ru, Т.П. Аванесова¹ avanesova1@mail.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В данной статье представлен сравнительный анализ экономической целесообразности использования модернизированных судов наряду с новыми морскими автономными надводными судами (МАНС) в условиях нестабильной мировой экономики. Определены основные проблемы эскортирования судов в стеснённых условиях плавания, подхода, швартовки к причалу, при ограниченной пропускной способности портов и диспетчеризации в узкостях. Противоречия между прогнозируемой разницей стоимости и эффективностью применением концепции системы автономного судовождения в порту (БЭС-СП) на базе технологии двух опорных точек и МАНС способствуют постановке цели данного исследования. Рассмотренный с точки зрения двух парадигм вариант модернизации судов до четвертого уровня автономности посредством метода аналогии определил ряд проблем, в числе которых невозможность её полноценной реализации. Сделан вывод о том, что повышение уровня безопасности и автономности, а также исключение человеческого фактора, предполагают возможность использования азимутальных буксиров-автоматов в рамках концепции БЭС-СП, являющейся государственным заказом.

Ключевые слова: Система автономного судовождения в порту, технология двух опорных точек, эксплуатационное обоснование, экономическая целесообразность, норма прибыли, эксплуатационные издержки, автоматизация, азимутальные буксиры-автоматы, внешнее распределенное подруливающее устройство, человеческий фактор, система высокоточной проводки и швартовки, система мониторинга швартовых операций, автоматический гидрометеомониторинг морской акватории.

Для цитирования: Дергилев В. А., Жук С. С., Аванесова Т. П. Анализ экономической целесообразности использования концепции системы автономного судовождения в порту, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 11—16. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.001

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.001>

Analysis of the economic feasibility of using the concept of the autonomous navigation system in the port

Viktor A. Dergilev¹ viktor315464@mail.ru, Sergey S. Zhuk¹ sezh.zhuk.99@mail.ru,

Tatyana P. Avanesova¹ avanesova1@mail.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. The article presents a comparative analysis of the economic feasibility of using modernized ships along with new maritime autonomous surface ships (MASS) in an unstable global economy. The main problems of escorting ships in narrows, approaches, when mooring to a berth and dispatching with limited port capacity and in congested waters are identified. The contradictions between the predicted cost difference and the effectiveness of applying the concept of the unmanned ship navigation system in the port based on the technology of two reference points and MASS helps to formulate the goal of this study. Considered from the point of view of the two paradigms, the option of upgrading ships to the fourth level of autonomy through the analogy method identified a number of problems, including the impossibility of its full implementation. It is concluded that increasing the level of safety and autonomy, as well as eliminating the human factor, involves using azimuthal automatic tugboats as a part of the concept of the unmanned ship navigation system in the port, which is a part of the state order.

Keywords: autonomous ship navigation system in the port, two reference points technology, operational justification, economic feasibility, rate of return, operating costs, automation, automatic azimuthal tug, external thrusters, human factor, high-precision pilotage, mooring operations monitoring system, sea area automatic hydro-meteorological monitoring.

For citation: Viktor A. Dergilev, Sergey S. Zhuk, Tatyana P. Avanesova. Analysis of the economic feasibility of using the concept of the autonomous navigation system in the port, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 1, P. 11—16. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.001

Введение

Современные тенденции в развитии автономного судовождения (АС) способствуют созданию автономных судов в судоходной отрасли. Под автономным судовождением (АС) подразумевается, способность грузового судна, без наличия экипажа на борту, самостоятельно выполнять автономные рейсы как в открытом море, так и в портовых акваториях.

На стадии определения экономической эффективности при строительстве автономного судна требуется эксплуатационное обоснование (ЭО), используемое для расчетов и оценки его эффективности в соответствии с различными параметрами стоимости [1]. Считается, что до проектирования судов такого типа следует учитывать такие характеристики автономных судов как рентабельность, срок окупаемости, нормы доходности и т.д. Экономия грузоподъемности и расхода топлива могут быть обеспечены за счет оптимальных сочетаний главных размерений, коэффициента полноты, мощности, скорости и т.д. Провозная способность судна, эксплуатационные расходы, доходы, прибыль, единовременные затраты, а, следовательно, и показатели экономической эффективности, а также стоимость судна обусловлены внедрением дополнительных технических средств для реализации автономного судовождения в акватории портовых вод. Несомненно, стоимость перевозки грузов будет зависеть от стоимости подобных судов, которые в свою очередь повлияют на среднюю норму прибыли и эксплуатационные издержки.

Поскольку в основу построения большинства цен на морские перевозки заложена калькуляция перевозочных ставок или расходов, то средняя ставка определяется как сумма средних затрат, связанных с перевозкой, нормы прибыли, устанавливаемой в виде надбавки к издержкам. Уровень этой надбавки зависит от вида груза, величины грузопотока, особенностей рынка, целей судоходной компании и т. д. Исходя из завышения стоимости строительства и эксплуатации автономных судов, средняя ставка будет возрастать с увеличением затрат на обслуживание [2].

Следует отметить, что судоходные компании могут построить такие суда только за свой счет или в отдельных случаях с поддержкой со стороны государства в виде налоговых льгот, что довольно сильно влияет на бюджет и норму прибыли судоходной компании. Поэтому актуальным будет определение соответствующих фрахтовых ставок, величина которых обеспечивала бы возврат вложенных средств в приемлемые сроки, - учёт возврата инвестиций за его нормативный срок эксплуатации. Однако такие ставки будут гораздо больше в сравнении со сложившимися на рынке перевозок [3]. В данном случае автономные суда могут оказаться невостребованными по экономическим соображениям.

Исходя из выше перечисленного, следует сделать вывод о том, что возникают вопросы оплаты увеличенной стоимости за фрахт со стороны как

грузоотправителей, так и грузополучателей. Следует обратить внимание, что в условиях нестабильной мировой экономики возникает дилемма прибыли судовладельца при строительстве новых автономных судов или модернизации старых.

Основная часть

На сегодняшний день уже чётко сформулированы 2 парадигмы автономного судовождения:

- от точки высадки лоцмана до точки приёма лоцмана;

- от причала до причала.

Для решения задач, связанных с первой парадигмой, логичным и экономически выгодным решением является оснащение грузового судна минимально-необходимым оборудованием, достаточного для перехода.

Парадигмы от причала до причала подразумевает безэкипажное выполнение грузовым судном следующих функций: раскантовка; отход от причала; выход из порта; заход в порт; подход к причалу; швартовку.

Для выполнения таких сложных задач требуют от автономных крупнотоннажных грузовых судов наличие соответствующего конструкционного и технического обеспечения.

Использование классических буксиров в связке с безэкипажным судном будет реализовываться с привлечением швартовой команды, а также ограничивать акваторию маневра из-за использования буксирных концов. В этом случае об автономном судовождении говорить не приходится.

Решением для такого судна будет являться модернизация и внесение конструкционных изменений в пропульсивную систему судна. Следует отметить, что без соответствующих изменений портовой техносферы, такие конструкционные изменения судна не позволят ему стать к причалу с целью проведения грузовых операций. Хотя данная модернизация способствует решению вопроса парадигмы автономного судовождения от причала к причалу, вывод судна из эксплуатации и установка подруливающих устройств и азиподов, по нашему мнению, ощутимо повлияет на стоимость грузоперевозок и уменьшение перевозимого объёма груза. Предполагается, что внедрённое оборудование будет востребовано только в 5% от времени эксплуатации. Остальные 95% времени эксплуатации подруливающих устройств останутся невостребованными.

Возможным решением является реализация концепции автономного судовождения в порту (БЭС СП). Данная концепция, являющаяся государственным заказом, входит в разработку средств портового оборудования, и выполняется в рамках научно-исследовательской лаборатории «Автоматизация судовождения» при «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова» [4,5].

Концепция состоит из берегового, морского и судового сегментов, объединённых цифровой платформой администрации водного бассейна (см. рис.1), которая автоматизирует весь процесс захода грузового судна в порту.



Рис. 1. Концепция осуществления автономного судовождения в рамках порта

Считаем, что повышение маневренности грузовых крупнотоннажных судов в стесненных условиях плавания в портовой акватории предполагает возможность использования азимутальных буксиров-автоматов (АБА) (см. рис.2).



Рис. 2. Швартовка крупнотоннажного судна к терминалу с использованием АБА

Группа буксиров-автоматов, закреплённых на жёсткой сцепке, выполняет функцию внешнего распределенного подруливающего устройства грузового крупнотоннажного судна в портовой акватории в режиме автономного управления или

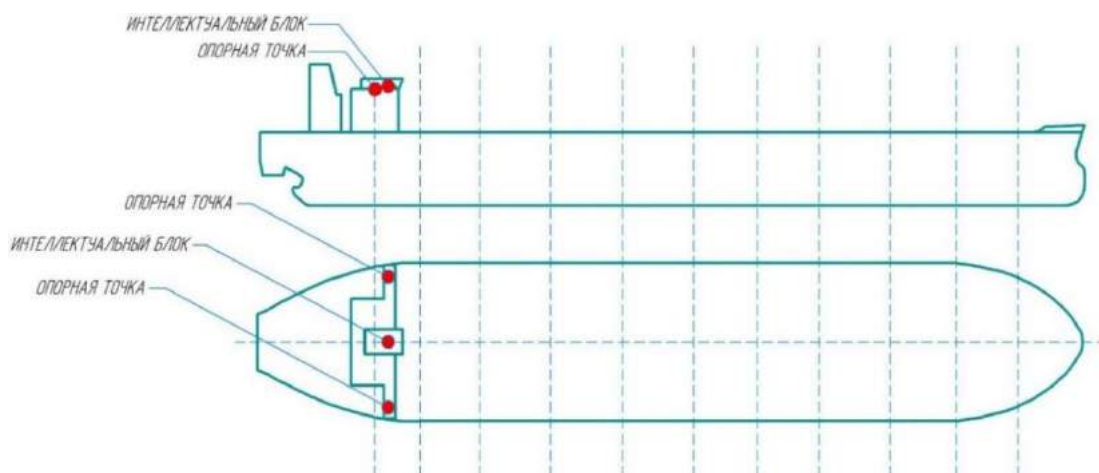


Рис. 3. Схема расположения ИБ/СВПШ на грузовом судне

Система мониторинга швартовых операций (СМШО) позволяет производить измерение дистанции до объекта с помощью лазерного оптического измерителя (ЛОИ), что позволяет отслеживать величину поперечного смещения,

дистанционного пилотирования из центра дистанционного управления судами [6]. Такое решение позволит увеличить провозную способность судна, уменьшить эксплуатационные расходы и самое главное, сократить риск человеческого фактора при выполнении должностных инструкций [7].

Отсутствие экипажа на АБА очень сильно влияет на уменьшение аварийности и повышает безопасность судоходства. Также использование АБА позволяет решить проблему диспетчеризации движения судов в узком бассейне икратно повысить пропускную способность портов в морской зоне за счет жесткой сцепки. За счёт более простой конструкции, меньшего размера и отсутствия систем жизнеобеспечения, достигается кратное снижение стоимости постройки и эксплуатации буксира по сравнению с буксиром аналогичной мощности. Средняя стоимость постройки одного азимутального буксира-автомата составляет около 200млн рублей.

Использование двух систем высокоточной проводки и швартовки (СВПШ):

- СВПШ с установкой на буксир или автономное судно;
- носимый лоцманский комплект (НЛК) на необорудованном судне СВПШ.

СВПШ позволяет определять не только местоположение грузового судна и буксиров, участвующих в операциях проводки и швартовки. А также определять расстояния от любой точки корпуса судна до другого судна, причала или навигационных опасностей [8]. Частным случаем использования этой функции является определение автономными буксирами расстояния до грузового судна при подходе и стыковке к нему для дальнейшего эскортирования. Данное решение позволит судоходным компаниям сохранить старые суда до полного возврата инвестиций в период нормативного срока эксплуатации и отказаться, пока это не станет экономически выгодным, от постройки нового автономного судна.

вычисление продольного и вертикального смещения подвижного объекта путём обработки кадров и получение видеопотока с одного из устройств видеорегистрации в зависимости от дистанции до объекта.

Система автоматического гидрометеомониторинга морской акватории (АСГММ), предназначена для построения трех дополнительных слоев электронной карты в реальном времени, - поля ветра, волнения и течения для заданной акватории. В сегменте применяются буи, оборудованные датчиками скорости и направления ветра, течения, высоты и среднего периода волн. Анализируемые данные отображаются на планшете НЛК/СВПШ.

Анализируя экономическую целесообразность использования сегментов концепции, следует обратить внимание на амортизацию автономного судна и концепцию БЭС СП, позволяющую распределить стоимость в течении срока эксплуатации. Морская беспилотная навигация с помощью интеллекта в сетях "MUNIN", предложенная специалистами Фраунгоферовского института и исследовательской группы "SINTEF", для создания средства транспортировки грузов в морской индустрии, имеет высокую себестоимость. Из-за отсутствия данных о стоимости судна и оборудования при расчёте и оценке строительства, устанавливаемого на автономных судах, следует сделать сравнение предлагаемого прототипа балкера типа "Handymax" водоизмещением 75000 тонн и нового судна на примере танкера типа "Aframax". Стоимость балкера с целью определения затрат и выгоды использования "Handymax" в 2015 году составляла около 35млн. долларов, что на 25% больше обычного судна с таким же водоизмещением с обозначенной стоимостью приблизительно в 28 млн. долларов [9,10].

В нашем научном исследовании определена средняя стоимость "Aframax", составляющая 60 млн. долларов [11], с надбавкой стоимости судна с автоматизированным оборудованием составит примерно 75млн. долларов, что на 25% больше рыночной стоимости. Определение годовой нормы амортизации для автономного судна типа Aframax:

$$\frac{100\%}{25 \text{ лет}} = 4\% \quad (1)$$

где 25 лет – срок эксплуатационного пользования.

Рассчитываем годовую норму амортизации:

$$75000000 \$ \cdot 0,04 = 3000000 \$ \quad (2)$$

Отсюда можно сделать вывод о том, что ежегодно в счёт амортизации будут списываться 3млн долларов, что за 25 лет покроет всю сумму приобретения данного судна. Что касается концепции БЭС СП с учетом использования всех сегментов, включая 4 азимутальных буксира-автомата, стоимость составит 11,8 млн. долларов.

Определение годовой нормы амортизации для БЭС СП составляет:

$$\frac{100\%}{15 \text{ лет}} = 8\% \quad (3)$$

где 15 лет – срок эксплуатационного пользования. Годовая норма амортизации составит:

$$11800000 \$ \cdot 0,08 = 942857 \$ \quad (4)$$

Ежегодно в счёт амортизации будут списываться 942857\$, что за 15 лет покроет всю сумму использования данной концепции.

Расчёты, связанные со сборами и эксплуатационными расходами в порту, не будут значительно отличаться и, их не следует принимать в учёт. Сборы для наливного танкера водоизмещением 100000 тонн в порту Новороссийск составляют ~33000\$ [12].

Внедрение концепции БЭС СП в порту г. Новороссийска позволит повысить уровень автономности порта без изменения эксплуатационных, иных расходов и сборов для судовладельца с уменьшением риска человеческого фактора [13] и, следовательно, аварийности в портовых водах, влияющих на уменьшение расходов и потерь судовладельца. Даже при расчёте окупаемости концепции для внедрения дополнительного сбора на обслуживание потребуется приблизительно 100\$, то при ежедневном заходе 80 судов в порт [14], сумма будет составлять:

$$100 \$ \cdot 80 = 8000 \$ \quad (5)$$

Для ежегодной окупаемости, это будет 2880000\$ согласно расчёту:

$$(8000 \$ \cdot 30 \text{ дней}) \cdot 12 = 2880000 \$ \quad (6)$$

А это позволит полностью окупить БЭС СП за 4,1 года.

Заключение

Исходя из проведённой аналогии, мы получим прогнозируемую разницу стоимости автономного оборудования в процентном соотношении. Это составляет 25%. При таком расчёте судовладельцу не выгодно доплачивать 15 млн. долларов для строительства автономного парохода. Исходя из количества заходов судна в порт, выплаты по портовым сборам, увеличенные на 100\$ за весь период эксплуатационного пользования судна, к примеру, при 50 заходах ежегодно составят 125000\$, что намного меньше доплаты в 15 млн. долларов на строительство нового автономного парохода. Немаловажным является то, что концепция позволяет уменьшить риск аварийности в порту, позволяющий сократить расходы на штрафы в условиях аварийных расходов в порту.

Литература

1. Васильева О. Ю., Никулина М. В., Платов Ю. И. Выбор эффективных судов по критерию предельной стоимости при эксплуатационном обосновании. Научные проблемы водного транспорта. 2021, 172-181 с.
2. Платонов Ю.И. Определение стоимости фрагования судов. Вестник ВГАВТ 41, 2014.
3. Платов А.Ю., Платов Ю.И. Методика определения фраговой ставки с учетом инвестиционной составляющей. Специальный выпуск вестника ВГАВТ. Обоснование тарифов на перевозки грузов речным транспортом, 2008.
4. <https://www.rts-tender.ru/poisk/id/I0173100009521000204-1/>
5. Паспорт проекта – маяк «Автономное судовождение» №10185п-П50 от 23 сентября 2021 года

6. Володин, А. Б., Преснов, С. В., Якунчиков, В. В. НА ПУТИ К АВТОНОМНОМУ СУДОХОДСТВУ. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования, 22(4), 2021, 355-363 с.
7. Сенченко В.Г. Разработка технологических и технических решений для реализации технологии безопасного судовождения. Отчёт НИЛ. ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2021.
8. Стороженко, А. В., Попов, В. В., Аванесова, Т. П. Некоторые вопросы позиционирования судна вследствие потери сигнала навигационной системы. Транспортное дело России, (3), 2016, 105-107 с.
9. Сенченко В.Г. Создание технологии имитационного моделирования пилотирования и элементов автономного маневрирования стай азимутальных буксиров-автоматов. Отчёт НИЛ. ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова 2022.
10. Кондратьев А. И., Худяков О. А., Попов А. Н. О необходимости внедрения беспилотных судов в торговый флот России. Транспортное дело России. № 6, 2016, 138-140 с.
11. https://www.korabel.ru/news/comments/obzor_21-oy_nedeli_2015_goda.html
12. https://www.korabel.ru/news/comments/spros_i_ceny_na_novye_tankera_ozhidaniya_2022_goda.html
13. <https://www.myshiptracking.com/ru/ports/port-of-novorossiysk-in-ru-russia-id-2976>
14. Аванесова Т. П., Язов Д. В., Меланич А. В. Способ решения проблемы уменьшения влияния человеческого фактора при расхождении судов в море. Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. №. 1 (133), 2014, 126-130 с.

References

1. Vasilyeva O. Yu., Nikulina M.V., Platov Yu. I. The choice of effective vessels according to the criterion of maximum hundred-capacity during operational justification. Scientific problems of water transport 2021, 172-181 p.
2. Platonov Yu.I. Determination of the cost of chartering ships. VGAVT Bulletin 41, 2014.
3. Platov A.Yu., Platov Yu.I. Methodology for determining the freight rate taking into account the investment composition. Special issue of the VGAVT bulletin. Justification of Tariffs for Transportation of Goods by River, 2008.
4. <https://www.rts-tender.ru/poisk/id/I0173100009521000204-1/>
5. Passport of the project – lighthouse “Autonomous Navigation” №10185п-П50 from 23 September 2021.
6. Volodin, A. B., Presnov, S. V., Yakunchikov, V. V. ON THE WAY TO AUTONOMOUS SHIPPING. Bulletin of the Ros-Sia University of Peoples' Friendship. Series: Engineering Studies, 22 (4), 2021, 355-363 p.
7. Senchenko V.G. Development of technological and technical solutions for the implementation of the technology of silent navigation. NIL report. GMU named after Adm. F.F. Ushakova, 2021.
8. Storozhenko, A.V., Popov, V.V., Avanesova, T.P. Some issues of positioning the vessel following the loss of the signal of the navigation system. Transport.
9. Senchenko V.G. Creation of simulation modeling technology of piloting and elements of autonomous maneuvering of azimuthal tugboats-automatics. Report of Research Laboratory. Admiral F.F. Ushakov 2022.
10. Kondratyev A.I., Khudyakov O.A., Popov A.N. Concerning the necessity to introduce unmanned ships in the merchant fleet of Russia. Transportnoe delo Rossii. №. 6, 2016, 138-140 с.
11. https://www.korabel.ru/news/comments/obzor_21-oy_nedeli_2015_goda.html
12. https://www.korabel.ru/news/comments/spros_i_ceny_na_novye_tankera_ozhidaniya_2022_goda.html
13. <https://www.myshiptracking.com/ru/ports/port-of-novorossiysk-in-ru-russia-id-2976>
14. Avanesova T.P., Yazov D.V., Melanich A.V. A way to solve the problem of reducing the influence of the human factor when ships diverge at sea. Bulletin of Adygea State University. Series 4: Natural-mathematical and technical sciences. №. 1 (133), 2014, 126-130 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

Виктор Алексеевич Дергилев., младший научный сотрудник НИЛ «Автоматизация «судовождения», аспирант кафедры «Судовождения», ГМУ им. адмирала Ф.Ф. Ушакова

Viktor A. Dergilev, Junior researcher of the Research Institute “Automation of Navigation”, post-graduate student, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93,

Сергей Сергеевич Жук., младший научный сотрудник НИЛ «Автоматизация «судовождения», аспирант кафедры «Судовождения», ГМУ им. адмирала Ф.Ф. Ушакова»

Sergey S. Zhuk, Junior researcher of the Research Institute “Automation of Navigation”, post-graduate student, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93,

Татьяна Панайотовна Аванесова, кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и информационные технологии», ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93., e-mail: avanesova1@mail.ru

Tatyana P. Avanesova, PhD (Edu), Associate Professor of "Foreign Languages", Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: avanesova1@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 11.04.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.06.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 23.06.2023

Научная статья

УДК 64.011.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.002>

Выбор системы хранения груза при перевозке сжиженного природного газа речным транспортом

П.К. Калашников¹ kpk@gubkin.pro, А.А. Фокина¹ fokina.a@gubkin.ru, И.В. Самарин¹ ivs@gubkin.ru,
Н.В. Першин² N.Pershin@adm.gazprom.ru, Н.С. Макуренкова³ makurenkova.ns@gazprom-shelfproject.ru,
¹Российский государственный университет (НИУ) нефти и газа имени И.М. Губкина, ²«Газпром», ³«Газпром шельфпроект»

Аннотация. В условиях перевозки сжиженного природного газа по внутренним водным путям возможно применение специфических видов криогенных емкостей, не характерных для морских перевозок. Некоторые системы для хранения груза, распространенные на морских крупнотоннажных танкерах-газовозах нецелесообразны при малотоннажных перевозках. Таким образом, в работе проанализированы возможные системы хранения груза при перевозке сжиженного природного газа речным транспортом. Рассмотрены достоинства и недостатки каждой из криогенных систем хранения груза, критерии, от которых зависит их выбор, а также возможность использования каждой системы в зависимости от нахождения и количества конечных потребителей. При поставке сжиженного природного газа крупным потребителям целесообразно использование мембранных систем, достоинствами которых является наиболее полное использование подпалубного пространства и дешевизна теплоизоляционных материалов. Однако их применение невозможно при отгрузке сжиженного природного газа малыми партиями по маршруту движения. В этом случае необходимо использовать вкладные независимые танки различных типов, которые способны противостоять слошину. Особо перспективным направлением является использование криогенных танк-контейнеров, быстроразъемных криогенных модулей и транспортных цистерн, благодаря которым значительно упрощается транспортная логистика и увеличивается возможность поставки сжиженного природного газа потребителям, расположенным не только вдоль бассейнов рек. Выбор системы хранения груза при перевозке сжиженного природного газа речным транспортом является одним из компонентов, обосновывающим структуру соответствующей автоматизированной системы управления.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, автономная газификация, танкер-газовоз, мембранные системы, вкладные независимые танки, танк-контейнеры, криогенные транспортные цистерны, автоматизированная система управления.

Для цитирования: Калашников П.К., Фокина А.А., Самарин И.В., Першин Н.В., Макуренкова Н.С. Выбор системы хранения груза при перевозке сжиженного природного газа речным транспортом, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 17—25. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.002

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.002>

Choice of a cargo storage system for the transportation of liquefied natural gas by river transport

Pavel K. Kalashnikov¹ kpk@gubkin.pro, Anastasia A. Fokina¹ fokina.a@gubkin.ru, Ilya V. Samarina¹ ivs@gubkin.ru, Nikita V. Pershin² N.Pershin@adm.gazprom.ru, Natalya S. Makurenkova³ nmakurenkova@mail.ru,
¹National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russian Federation, ²Gazprom PJSC, St. Petersburg, Russian Federation, ³Gazprom Shelfproject JSC, Moscow, Russian Federation

Abstract. In the conditions of transportation of liquefied natural gas by inland waterways, it is possible to use specific types of cryogenic containers that are not typical for maritime transportation. Some cargo storage systems, common on sea-going large-tonnage gas carriers, are inappropriate for small-tonnage transportation. Thus, the paper analyzes possible cargo storage systems for the transportation of liquefied natural gas by river transport. The advantages and disadvantages of each of the cryogenic cargo storage systems, the criteria on which their choice depends, as well as the possibility of using each system depending on the location and number of end users are considered. When supplying liquefied natural gas to major consumers, it is advisable to use membrane systems, the advantages of which are the most complete use of the underdeck space and the low cost of heat-insulating materials. However, their use is impossible when shipping liquefied natural gas in small batches along the route. In this case, it is necessary to use independent tanks of various types that are able to withstand sloshing. A particularly promising area is the use of cryogenic tank containers, quick-detachable cryogenic modules and transport tanks, which greatly simplifies transport logistics and increases the possibility of supplying liquefied natural gas to consumers located not only along river basins. The choice of a cargo storage system for the transportation of liquefied natural gas by river transport is one of the components that justifies the structure of the corresponding automated control system.

Keywords: liquefied natural gas, off-grid gas supply, liquefied gas tanker, membrane systems, independent tanks, tank-containers, cryogenic transport tanks, automated control system.

For citation: Pavel K. Kalashnikov, Anastasia A. Fokina, Ilya V. Samarin, Nikita V. Pershin, Natalya S. Makurenkova Choice of a cargo storage system for the transportation of liquefied natural gas by river transport, Marine intelligent technologies. 2023. № 3 part 1, P. 17—25. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.002

Введение

В 2022 году уровень газификации регионов Российской Федерации достиг 73% [1]. Негазифицированными остаются преимущественно северо-восточные регионы страны, для которых характерны не только специфические природно-климатические условия, но и низкая плотность населения, большая удаленность потребителей друг от друга, малое количество крупных предприятий. В связи с этим развитие трубопроводной системы в регионах с такими особенностями затруднено и часто экономически нецелесообразно.

Учитывая особенности этих территорий, более рациональным решением может стать автономная газификация с использованием сжиженного природного газа (далее – СПГ). При этом транспортировка достаточных объемов СПГ может осуществляться с помощью водного транспорта по речным маршрутам.

В статье [2] рассматриваются такие варианты для транспортирования СПГ, как создание новых малотоннажных специализированных танкеров-газовозов, модернизация корпусов уже существующих нефтеналивных танкеров типа «река-море», использование СПГ-бункеровщиков и

перевозка криогенных контейнеров и автомобильных цистерн с помощью барж.

Наиболее важным для каждого из рассматриваемых случаев является выбор системы хранения груза, т.е. выбор типа танков, либо выбор контейнеров и цистерн, перевозимых на судне. На рисунке 1 приведена схема, на которой показаны варианты систем хранения груза, использование которых возможно на соответствующих специализированных судах-перевозчиках СПГ.

Если транспортирование СПГ по внутренним водным путям планируется осуществлять с помощью специализированных танкеров-газовозов или модернизированных нефтеналивных танкеров, то одним из главных критериев выбора системы хранения груза является режим работы криогенных танков.

В процессе перевозки СПГ танкер-газовоз может отгружать все топливо из танка сразу, а может небольшими партиями по маршруту движения. Движение при частичном заполнении танков получило название «milk run» (принцип «молоковоза»).

Для организации системы хранения СПГ на речных танкерах-газовозах могут использоваться мембранные системы, а также вкладные независимые танки.



Рис. 1 Классификация систем хранения груза при перевозке СПГ речным маршрутом. Предложена авторами

Мембранные системы

В настоящее время на танкерах-газовозах применяются две основные мембранные системы для перевозки СПГ [3]:

- GTT Mk III – Technigaz Mark III;
- GTT №96 – Gaztransport № 96.

Мембранная система Mark III представляет собой систему удержания и изоляции СПГ, непосредственно поддерживаемую конструкцией корпуса танкера-газовоза. Она состоит из первичной гофрированной мембраны из нержавеющей стали, с содержанием 9% никеля, которая располагается на сборных теплоизолирующих панелях. Теплоизолирующая панель в свою очередь включает в себя два слоя изоляции из армированной

полиуретановой пены, между которыми заключен вторичный барьер – композитный материал в виде алюминиевой фольги, заключенной между двумя стеклянными пластинами. На поверхности теплоизолирующей панели находятся специальные крепления, к которым впоследствии приваривают первичный барьер [3].

Таким образом, данная система представляет собой своего рода конструкцию из наложенных друг на друга панелей суммарной толщиной в 270 мм (рис. 2) [4], которые соединяются между собой с помощью полиуретанового клея. Процент потерь груза в день (Boiling off Rate (BOR) – отношение объема отпарного газа к объему всего танка) для этой системы составляет 0,15%. На сегодняшний день основными модификациями системы являются Mark III Flex с суммарной толщиной 400 мм и показателем BOR до

0,085% и Mark III Flex+ с толщиной 480 мм и показателем BOR 0,07%.

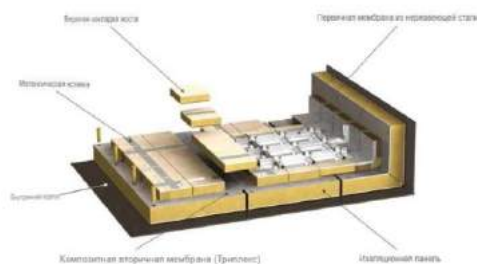


Рис. 2 Конструкция стенки мембранной системы Mark III (GTT) [4]

Мембранными танками с применением технологии Mark III оснащено более 200 действующих танкеров-газовозов [4]. Основным преимуществом данной системы является использование стандартных сборных компонентов, которые могут соответствовать резервуарам любой формы и вместимости. Они разработаны для массового производства и просты в сборке.

Перейдем к рассмотрению системы GTT № 96. Первичный барьер системы состоит из рулонного инвара толщиной 0,7 мм. Инвар – сплав железа (64%) с никелем (36%) [5]. В отличие от мембраны Mark III, которая покрыта ребрами, мембрана системы № 96 гладкая, поскольку сплав инвар не подвергается значительным температурным деформациям.

Первичная мембрана крепится к слою изоляции посредством специальных загнутых язычков. Первичная и вторичная мембраны соединяются с корпусом танкера-газовоза с помощью специального элемента – инварной трубки, которая передает напряжения от борта танкера-газовоза к мембранам.

Фанерные ящики первичной изоляции в более ранних модификациях заполнялись перлитом. Этот материал имеет более низкую теплопроводность и существенно больший вес по сравнению с другим – стекловатой. Сейчас фанерные ящики первичного слоя изоляции заполняются именно ей. При наполнении двух слоев ящиков стекловатой суммарный показатель BOR составляет 0,125–0,130% от общего груза в день [3]. Суммарная толщина данной системы составляет 530 мм (рис. 3).



Рис. 3 Конструкция стенки системы GTT №96 [6]

Данная система также подвергалась модификациям. Первой моделью является № 96 LO3. В ней был добавлен третий слой изоляции при сохранении изначальной толщины.

Последний разрабатываемый продукт компании GTT – это система № 96 Max. Ее принципиальное отличие состоит в использовании колонн, поддерживающих слои изоляции и передающих напряжения к корпусу танкера-газовоза вместо

балок, которые используются в оригинальной системе. Это техническое решение позволило значительно снизить урон от слошинга – волны, возникающей в перевозимом продукте внутри танка при его наполненности от 10 до 70%. Система планируется для применения на плавучих хранилищах и регазификационных пунктах, чья эксплуатация подразумевает постоянное изменение уровня наполнения танка.

Несмотря на повсеместную распространенность систем, разработанных компанией GTT, в последние годы на рынке появляются новые решения, разработанные на самых крупных судовых верфях, которые строят подавляющее большинство танкеров-газовозов.

Рассмотрим уже используемую систему KC-1. Ее принципиальное отличие – в использовании только одного слоя теплоизоляции – плотной полиуретановой пены. Толщина этой теплоизоляции – 232 мм. Для фиксации панели ее укрепляют с обеих сторон фанерными прослойками. Вся эта конструкция соединяется вместе посредством анкера [7].

Следующая система – SCA W/S – также известна по пресс-релизам как KC-S. В данной системе в качестве теплоизоляции используется специальная полиуретановая пена, усиленная стекловолокном [8].

Также в завершающейся стадии разработки находится система Solidus корейской судовой верфи DSME (Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering). Solidus была презентована в декабре 2017 г., причем был заявлен самый низкий BOR из всех существующих на рынке – 0,05%. Утверждается, что такие показатели были достигнуты за счет нового варианта теплоизоляции под названием Elastospay, разработанной в сотрудничестве с компанией BASF. Эта теплоизоляция выполнена не в виде пластин, как в большинстве других систем, а напылением теплоизоляционной пены прямо на изолируемую поверхность первичной мембраны. Материал формирует ровный и бесшовный слой изоляции без трещин и стыков, что исключает появление тепловых мостов [9].

Благодаря появлению многообразия вариантов мембранных систем, возникает вопрос, как выбрать подходящую под конкретные режимы эксплуатации, ведь условия движения танкера-газовоза в море заметно отличаются от условий реки.

При выборе мембранной системы в первую очередь стоит опираться на такие показатели как уровень BOR и суммарную толщину стенки. Каждый из этих параметров по-своему влияет на конечные транспортные затраты: от толщины системы зависит общее количество груза, которое танкер-газовоз может перевезти за один рейс, а чем больше груза перевезено, тем меньше удельная стоимость перевозки. От уровня BOR также зависит количество потерянных средств от выпарившегося газа.

Основное преимущество мембранных систем заключается в наиболее полном использовании внутрисудового подпалубного пространства. Кроме того, суммарный вес мембранной системы значительно ниже, чем вкладной. В то же время у таких систем есть и недостатки. Основной – невозможность эксплуатации при частичном заполнении вследствие слошинга, который может привести к разрушению стыков мембран.

Однако сегодня были разработаны такие системы, как SCA или № 96 Max, которые адаптированы под условия повышенного слошинга. И, возможно, их применение в конструкции речных танкеров-газовозов позволит перевозить СПГ сразу нескольким крупным потребителям по маршруту движения в условиях частичного заполнения.

ТИПЫ ВКЛАДНЫХ КРИОГЕННЫХ ТАНКОВ

Как было сказано ранее, применение вкладных независимых танков наиболее целесообразно при их частичном заполнении, т.е. при отгрузке СПГ небольшими партиями по маршруту движения.

Независимые танки можно разделить на три группы в зависимости от методов расчета, а также предъявляемых требований при испытаниях:

- тип А – прочность отвечает требованиям, предъявляемым к судовым конструкциям в соответствии с нормами прочности;

- тип В - прочностные характеристики подтверждаются результатами модельных испытаний и расчетами, выполненными по методикам определения уровня действующих напряжений, усталостной долговечности, трещинообразования;

- тип С - отвечают требованиям, предъявляемым к сосудам, рассчитанным на транспортировку сжиженного газа под давлением [10].

Танки типа А по форме являются призматическими. Как правило, они сформированы из плоскостных конструкций. Обязательно имеется продольная переборка, разделяющая танк на две части. Конструкция также предусматривает наличие негерметичных поперечных и продольных переборок, которые предназначены для снижения влияния свободной поверхности сжиженного газа.

Типичным танком типа А является система LNT A-BOX, которая представляет собой самонесущий призматический независимый резервуар типа А, размещенный в изолированном грузовом отсеке с полным вторичным барьером. Модель судна с данной системой хранения приведена на рисунке 4 [11]. Переборки внутри цистерн сдерживают движение жидкости, устраняя появление слошинга независимо от уровня жидкости в цистернах. Кроме того, прочная конструкция каркаса резервуара предотвращает проблемы с вакуумом, упрощая контроль давления и погрузочно-разгрузочные работы. Теплоизоляция со вторичным барьером перемещена во внутреннюю часть корпуса для облегчения визуального доступа к системе вторичного барьера, включая опорные конструкции и корпус резервуара. Трюмное пространство защищено от выплескивания груза, что позволяет организовать гибкую систему холодоизоляции.



Рис. 4 Модель судна с танками типа А [11]

Независимый резервуар, поддерживаемый конструкцией корпуса, защищает изолированные трюмные помещения от обширных импульсов выплескивания. Предотвращение выплескивания позволяет упростить геометрию угловых панелей, обеспечивая более эффективный объем и тонкие формы корпуса для повышения эффективности транспортировки (рис. 5) [11]. Толщина изоляционной системы может быть легко отрегулирована для достижения требуемой скорости BOR.

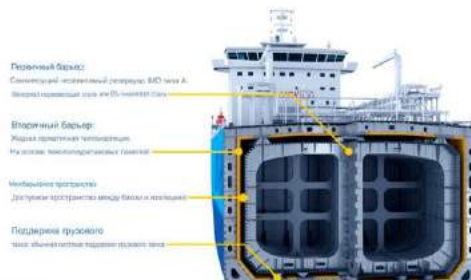


Рис. 5 Внутреннее строение танка типа А системы LNT A-BOX [11]

Танки типа В — независимые танки с частичным вторичным барьером, который выполнен в виде поддона, способного удержать СПГ в случае течи в первичном барьере. По форме танки этой системы могут быть призматическими или сферическими. Их основное отличие от танков типа А заключается в более строгих критериях, используемых в оценке прочности материала, из которого будет изготовлен танк, его износостойкости, ломкости в процессе старения материала [10].

Известным примером танков типа В являются сферические танки типа «Moss», которые составляют 41% мирового флота танкеров-газовозов перевозящих метан [12]. Системы хранения данного типа стали популярны за счет применения в конструкции самоподдерживающейся дешевой изоляции и возможности постройки танков отдельно от судна (рис. 6) [13]. Однако большой вес и малый объем резервуаров ограничивают применение танков типа «Moss» на малотоннажных танкерах-газовозах. Также требуются большие энергетические затраты для охлаждения алюминия, преимущественно из которого изготовлены танки типа «Moss», по сравнению с другими системами, в которых используется криогенная сталь или инвар.

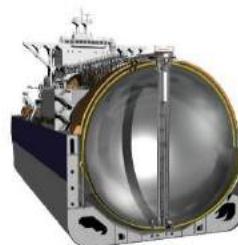


Рис. 6 Танк типа «Moss» в разрезе [13]

Существуют и другие концепты танков типа В призматической формы, такие как IHI SPB и NLI TS-X. Система IHI SPB представляет собой призматические цистерны из алюминиевого сплава и в основном применяется в качестве топливных

танков и продуктовых танков плавучих хранилищ СПГ. Криогенные танки разделены внутренними переборками на четыре части. Толщина тепловой изоляции танка составляет 250 мм. При этом коэффициент BOR составляет всего 0,08 % в сутки, а средний удельный вес танка 25 кг/м³ [14].

Танки типа NLI TS-X адаптированы под объем 900–30000 м³, заявленный коэффициент BOR составляет до 0,8 % в сутки, средний удельный вес – до 125 кг/м³. Конструкция рассчитана на транспортирование СПГ при атмосферном давлении. В 2013 году компаниями NLI Solutions, Rolls-Royce и Wilhelmsen Technical Solutions был разработан концепт баржи с использованием танков этого типа [15].

Танки типа С представляют собой сосуды, рассчитанные на работу под внутренним давлением, поэтому наиболее часто используются для модернизации малотоннажных судов. По форме могут быть сферическими или цилиндрическими. Такие танки имеют стенки большой толщины, поэтому легко выдерживают динамические нагрузки, создаваемые криогенной жидкостью. Для тепловой изоляции применяется напыляемый пенополиуретан или вакуумная изоляция [10].

Наиболее распространенным исполнением танков типа С являются цилиндрические танки с полусферическими днищами, применение которых позволяет уменьшить вес конструкции (рис. 7) [16]. Средний удельный вес цилиндрических танков такого типа составляет 73 кг/м³ [17].

Также существует модель двудольных танков типа С, которая представляет собой комбинацию двух цилиндрических танков. Средний удельный вес таких танков снижен до 55 кг/м³ [18]. Форма двудольных танков может варьироваться за счет изменения диаметров долей, а также расстояния удаления центров долей от линии симметрии. Увеличение количества долей танка и изменение геометрии расположения долей позволяет вписать систему в любой корпус танкера-газовоза.

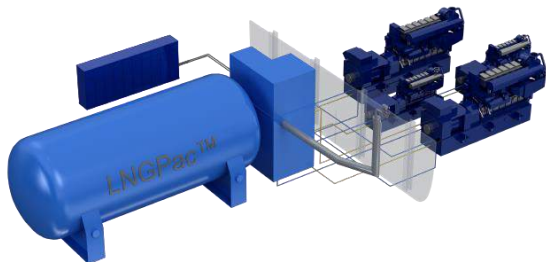


Рис. 7 Цилиндрический танк типа С компании Wartsila [16]

Использование криогенных танк-контейнеров и автомобильных цистерн

Криогенный танк-контейнер — стандартизированная тара, которая может быть использована при мультимодальных (т.е. при смене транспорта не требуется перетарка груза, достаточно просто переместить тару с одного транспорта на другой) перевозках СПГ железнодорожным, автомобильным, морским и речным транспортом.

Конструкция танк-контейнера включает в себя две основные части: каркас (рамные элементы) и

цистерну (танк) (рис. 8) [19], которая оборудована сливной арматурой и устройствами для осуществления разгрузки. Также внутри танк-контейнера могут быть установлены перегородки, выполняющие роль волнорезов, гасящие гидравлические удары во время движения и предотвращающие возникновение слошинга.



Рис. 8 Конструкция типичного танк-контейнера компании «ПитерЭнергоМаш» [19]

Разделение танк-контейнеров на типы регулируется системой международной стандартизации ISO 668:2020 [20]. Именно она определяет виды конструкций в зависимости от перевозки тех или иных грузов, для которых предназначена ёмкость. Для перевозки СПГ используются специализированные танк-контейнеры типа IMO 5 [19]. Также используется система Т-кодов от T1 до T75 согласно Portable Tank Instruction, признанной во всем мире. В такой системе танк-контейнеру, перевозящему СПГ, будет соответствовать код T50 [19].

Почти все танк-контейнеры сделаны на базе 20-футовой контейнерной рамы. Контейнеры-цистерны на базе 30-футовой рамы производятся редко. 40-футовые танк-контейнеры обычно применяются для перевозки сжиженных газов.

Основные типоразмеры танк-контейнеров [19]:

- стандартный 20-футовый танк-контейнер – имеет объем от 14 тыс. литров до 26 тыс. литров;
- SWAP-контейнеры, имеющие увеличенный размер — от 30 до 36 тыс. литров. При этом SWAP-контейнеры имеют стандартную 20-футовую раму;
- газовые танк-контейнеры – имеют объем 24 тысячи литров и рассчитаны на давление от 15 до 34,5 бар. Для перевозки СПГ используются контейнеры с 40-футовой рамой.

К основным преимуществам использования танк-контейнеров на речных судах, а также баржах можно отнести:

- возможность установки танк-контейнеров как на палубной площадке, так и внутри корпуса судна;
- стандартные типоразмеры (возможность установки контейнеров на уже существующих судах);
- экономия на транспортной логистике благодаря повышенной вместимости танк-контейнера по сравнению с авто- и ЖД-цистернами;
- отсутствие необходимости многократной перезагрузки блока при изменении вида транспорта. Это позволяет сократить время проведения погрузочно-разгрузочных операций и минимизировать потери груза.

Также следует отметить, что криогенные танк-контейнеры можно использовать не только для перевозки СПГ, но и в качестве стационарного

хранилища на специально подготовленной площадке.

Однако у типовых стальных танк-контейнеров есть и недостатки: большой вес конструкции; ограниченный срок службы, связанный с коррозией основного материала; недостаточная прочность конструкции. Все это неизбежно приводит к снижению объема перевозимого груза и росту его себестоимости.

Альтернативными стали и инвару материалами при изготовлении танк-контейнеров могут стать алюминий-скандиевые сплавы. При включении скандия в алюминиевый сплав происходит повышение прочности, пластичности, свариваемости материала за счет структурного соответствия кристаллических решеток этих металлов, а вес конструкции значительно снижается. Также алюминий-скандиевые сплавы отличаются повышенной коррозионной стойкостью. Так, например, длительность эксплуатационного периода танк-контейнера, изготовленного из алюминий-скандиевого сплава «1580», на 50% больше, чем такого же танк-контейнера, изготовленного из стали 09Г2С [21]. Однако у таких сплавов есть один существенный недостаток - скандий является дорогостоящим компонентом, требующим последующей сложной обработки.

Специалисты ООО НПО «Санкт-петербургская электротехническая компания» для перевода пассажирского судна типа «Нева» на двухтопливный режим работы предложили использование быстростъемных криогенных модулей для хранения СПГ на борту судна [22]. При этом такие модули имеют габариты, приемлемые для установки практически на любом речном судне, достаточный объем СПГ и легкость транспортировки от места заправки до конечного потребителя.

Критериями определения места размещения быстростъемных криогенных модулей СПГ на судне являлись безопасность будущей эксплуатации судна и минимизация длины трубопроводов всех материальных сред для уменьшения стоимости оборудования и работ по его монтажу. На основе данных критериев был выбран вариант размещения быстростъемных криогенных модулей СПГ на верхней палубе теплохода «Нева-6» непосредственно над машинным отделением.

В соответствии с разработанной технологией на открытой палубе судна, заблаговременно было подготовлено место для быстростъемных криогенных модулей, которое представляет собой каркас из сваренных металлических двутавровых балок, прикрепленных к бортам судна. Такой же подход может быть применен и к судну, перевозящему такие модули. При этом замена криогенных модулей с СПГ может проводиться в любом месте, где возможна швартовка судна и есть площадка для установки погрузчика.

Также в качестве системы хранения СПГ при перевозке по внутренним водным путям возможно использовать криогенные автоцистерны и полуприцепы-цистерны. Компания ПАО

«Криогенмаш» разработала полуприцеп-цистерну ППЦ-50/0,7 с показателем BOR 0,14%, масса перевозимого СПГ составляет 18 тонн [23].

Благодаря использованию таких автоцистерн, логистика перевозки может стать совсем простой, не требующей специального оборудования и техники: автомобильные емкости заполняются грузом, отгоняются на самоходное судно либо баржу, транспортируются по внутренним водным путям, а затем по автодорогам происходит доставка СПГ до потребителей, удаленных от берегов рек, позволяя таким образом охватить их большой объем, что в условиях низкой плотности населения является несомненным преимуществом данной системы хранения груза по сравнению с остальными.

Заключение

Основные задачи судостроения танкеров-газовозов любого типа – увеличение их грузовместимости при неизменных размерах корпуса, уменьшение стоимости изоляции емкостей, уменьшение времени постройки и модернизации танкеров-газовозов. Безусловно, на достижение всех этих показателей основное влияние оказывает система хранения груза.

В статье были рассмотрены основные системы хранения СПГ, которые могут использоваться новыми и модернизированными судами, а также баржами при транспортировании СПГ речными маршрутами. В ходе работы также были проанализированы критерии выбора каждой системы, их достоинства и недостатки.

Так, применение мембранных систем возможно на танкерах-газовозах, которые будут поставлять СПГ крупным потребителям, отгружая весь объем топлива из танков. Выбирая одну из мембранных систем необходимо ориентироваться на толщину слоя изоляции стенки и показатель BOR.

Применение вкладных независимых систем делает возможным отгрузку СПГ небольшими партиями по маршруту движения. Но стоит отметить, что один из самых популярных танков этого типа («Moss») не нашел применения на малотоннажных танкерах-газовозах ввиду своей громоздкости и малого объема полезного пространства для топлива. Их применение становится более целесообразным при увеличении габаритности танкера-газовоза и объема перевозимого СПГ.

Перспективным и наиболее мобильным направлением является использование криогенных танк-контейнеров и транспортных цистерн. За счет того, что манипуляции с судном при использовании таких систем сведены к минимуму, их применение кажется наиболее привлекательным на уже построенных и модернизирующихся судах.

Указанный анализ может быть использован при разработке структуры, а также принципов построения автоматизированных систем управления транспортировки сжиженного природного газа морским транспортом.

Литература

1. Уровень газификации в России к концу 2022 года достиг 73 процентов. РИА новости [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ria.ru/20230116/gazifikatsiya-1845114646.html> (дата обращения: 18.01.2023).

2. Калашников П.К., Фокина А.А., Самарин И.В., Першин Н.В. Транспортировка сжиженного природного газа по речным маршрутам: мировые тенденции и перспективы создания речного танкера-газовоза // Газовая промышленность. - 2023. - № 3. - С. 62-69.
3. Иванов Л.В., Анохин А.В., Зайцев А.В. Анализ мембранных систем хранения груза для танкеров-газовозов // Морской вестник. - 2019. - №2. - С. 21-24.
4. Mark III systems. GTT [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gtt.fr/technologies/markiii-systems> (дата обращения: 18.01.2023).
5. Азбука металла. Инвар [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://azbukametalla.ru/entsiklopediya/i/invar.html> (дата обращения: 02.04.2023)
6. № 96 systems. GTT [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gtt.fr/technologies/no96-systems> (дата обращения: 18.01.2023).
7. Hyeonwon Jeong, W. Jaewoo Shim. Calculation of boil-off gas (BOG) Generation of KC-1 membrane LNG tank with high density rigid polyurethane foam by numerical analysis // Polish Maritime Research. – 2017. – № 1.– P. 1–15.
8. Dai Gil Lee, Munkuen Ha, Haeki Jang. Smart Cargo Containment System Advanced (SCA) for LNG Carrier. – Conference: 2013 AIChE Spring National Meeting. – 2013.
9. DSME develops own LNG containment system [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.lngworldnews.com/dsme-develops-own-lng-containmentsystem/> (дата обращения 18.01.2023).
10. Международный кодекс постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженный газы наливом (Кодекс IGC – The International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk) – Санкт-Петербург: АО «ЦНИИМФ» – 2016.
11. LNT A-BOX system. LNT [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://lntmarine.com/lnt-a-box-system/#> (дата обращения 18.01.2023).
12. Танкеры-газовозы. Neftegaz.Ru [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://neftgaz.ru/tech-library/suda-neftgazovye-i-morskoe-oborudovanie-dlya-bureniya/142491-tankery-gazovozy/> (дата обращения 18.01.2023).
13. Cutaway of storage tank. Cielotech Online [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cielotech.wordpress.com/2018/01/07/lng-liquified-natural-gas/cutaway-of-storage-tank/> (дата обращения 04.02.2023)
14. Nagata Yoshinori, Tanoue Akira, Kida Takayouki, Kawai Takashi. IHI-SPB tank for LNG-fueled ship. IHI Engineering Review. 2015. Vol. 47. No 2. Pp. 15–21.
15. LNG Bunker Barge design. Rivieramm. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/lng-bunker-bargedesign-40032> (дата обращения 18.01.2023).
16. Wartsila LNGPac. Wartsila [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.wartsila.com/marine/products/gas-solutions/lng-as-fuel/lngpac> (дата обращения: 18.01.2023).
17. Баранов А. Ю., Иванов Л. В. Конструкционный анализ типов корпусов криогенных барж-резервуаров хранения СПГ // Морской Вестник. 2020. № 1 (73). С. 17–20.
18. Mathias Jansson. Innovations in large volume LNG fuel gas handling solutions. Slideshare [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.slideshare.net/MathiasJansson/innovations-in-large-volume-lng-fuel-gashandling-solutions> (дата обращения: 18.01.2023).
19. Танк-контейнеры. ПитерЭнергоМаш [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://piterenergomash.ru/images/katalog/proizvodstvo/present_tank_container.pdf (дата обращения: 18.01.2023).
20. ISO 668:2020 Контейнеры грузовые серии 1. Классификация, размеры и номинальные характеристики
21. Мамедова Л.Э., Гоголюхина М.Е. Инновационные технологии производства танк-контейнеров на судостроительном предприятии // Морские интеллектуальные технологии. - 2019. - №2. - С. 69-75.
22. Кириллов Н.Г. Водный транспорт на сжиженном природном газе: мировые тенденции и первое российское судно-газоход на СПГ // Транспорт на альтернативном топливе. - 2016. - №2. - С. 69-75.
23. Криогенмаш. Транспортные системы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cryogenmash.ru/catalog/transportnye-sistemy/> (дата обращения: 02.04.2023).

References

1. Uroven' gazifikatsii v Rossii k kontsu 2022 goda dostig 73 protsentov [The level of gasification in Russia reached 73 percent by the end of 2022]. RIA novosti [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://ria.ru/20230116/gazifikatsiya-1845114646.html> (data obrashcheniya: 18.01.2023).
2. Kalashnikov P.K., Fokina A.A., Samarin I.V., Pershin N.V. Transportirovka szhizhennogo prirodnogo gaza po rechnym marshrutam: mirovye tendentsii i perspektivy sozdaniya rechnogo tankera-gazovozza [Transportation of liquefied natural gas by river: World trends and prospects for development of river liquefied natural gas tankers] // Gazovaya promyshlennost'. - 2023. - № 3. - S. 62-69.
3. Ivanov L.V., Anokhin A.V., Zaytsev A.V. Analiz membrannykh sistem khraneniya gruzha dlya tankerov-gazovozov [] // Morskoy vestnik. - 2019. - №2. - S. 21-24.
4. Mark III systems. GTT [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://gtt.fr/technologies/markiii-systems> (data obrashcheniya: 18.01.2023).
5. Azbuka metalla. Invar [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://azbukametalla.ru/entsiklopediya/i/invar.html> (data obrashcheniya: 02.04.2023)
6. № 96 systems. GTT [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://gtt.fr/technologies/no96-systems> (data obrashcheniya: 18.01.2023).

7. Hyeonwon Jeong, W. Jaewoo Shim. Calculation of boil-off gas (BOG) Generation of KC-1 membrane LNG tank with high density rigid polyurethane foam by numerical analysis // Polish Maritime Research. – 2017. – № 1.– R. 1–15.
8. Dai Gil Lee, Munkuen Ha, Haeki Jang. Smart Cargo Containment System Advanced (SCA) for LNG Carrier. – Conference: 2013 AIChE Spring National Meeting. – 2013.
9. DSME develops own LNG containment system [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.lngworldnews.com/dsme-develops-own-lng-containmentsystem/> (data obrashcheniya 18.01.2023).
10. Mezhdunarodnyy kodeks postroyki i oborudovaniya sudov, perevozyashchikh szhizhenny gazы nalive (Kodeks IGC – The International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk) – Sankt-Peterburg: AO «TsNIIMF» – 2016.
11. LNT A-BOX system. LNT [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://intmarine.com/int-a-box-system/#> (data obrashcheniya 18.01.2023).
12. Tankery-gazovozy [liquefied gas tanker]. Neftegaz.Ru [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://neftegaz.ru/tech-library/suda-neftegazovye-i-morskoe-oborudovanie-dlya-bureniya/142491-tankery-gazovozy/> (data obrashcheniya 18.01.2023).
13. Cutaway of storage tank. Cielotech Online [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://cielotech.wordpress.com/2018/01/07/lng-liquified-natural-gas/cutaway-of-storage-tank/> (data obrashcheniya 04.02.2023)
14. Nagata Yoshinori, Tanoue Akira, Kida Takayouki, Kawai Takashi. IHI-SPB tank for LNG-fueled ship. IHI Engineering Review. 2015. Vol. 47. No 2. Pp. 15–21.
15. LNG Bunker Barge design. Rivieramm. [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/lng-bunker-bargedesign-40032> (data obrashcheniya 18.01.2023).
16. Wartsila LNGPac. Wartsila [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.wartsila.com/marine/products/gas-solutions/lng-as-fuel/lngpac> (data obrashcheniya: 18.01.2023).
17. Baranov A. Yu., Ivanov L. V. Konstruktsionnyy analiz tipov korpusov kriogennykh barzh-rezervuarov khraneniya SPG [Structural analysis of hull types for cryogenic LNG storage barges] // Morskoy Vestnik. 2020. № 1 (73). S. 17–20.
18. Mathias Jansson. Innovations in large volume LNG fuel gas handling solutions. Slideshare [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.slideshare.net/MathiasJansson1/innovations-in-large-volume-lng-fuel-gashandling-solutions> (data obrashcheniya: 18.01.2023).
19. Tank-konteynery [tank-containers]. PiterEnergomash [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: https://piterenergomash.ru/images/katalog/proizvodstvo/present_tank_container.pdf (data obrashcheniya: 18.01.2023).
20. ISO 668:2020 Konteynery gruzovye serii 1. Klassifikatsiya, razmery i nominal'nye kharakteristiki [Series 1 freight containers — Classification, dimensions and ratings]
21. Mamedova L.E., Gogolyukhina M.E. Innovatsionnye tekhnologii proizvodstva tank-konteynerov na sudostroitel'nom predpriyatii [Innovative technologies for the production of tank-containers at a shipbuilding enterprise] // Morskoe intelektual'nye tekhnologii. - 2019. - №2. - S. 69-75.
22. Kirillov N.G. Vodnyy transport na szhizhenom prirodnom gaze: mirovye tendentsii i pervoe rossiyskoe sudno-gazokhod na SPG [Water transport powered by liquefied natural gas: global trends and the first Russian LNG-powered vessel] // Transport na al'ternativnom toplive. - 2016. - №2. - S. 69-75.
23. Transportnye sistemy [Transport systems]. Kriogenmash [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://cryogenmash.ru/catalog/transportnye-sistemy/> (data obrashcheniya: 02.04.2023).

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

Павел Кириллович Калашников, кандидат технических наук, доцент, Российский государственный университет (НИУ) нефти и газа имени И.М. Губкина г. Москва, 119991, Ленинский пр-т, 65, корп. 1, kpk@gubkin.pro

Pavel K. Kalashnikov, Ph.D. (Eng), Assistant professor, National University of Oil and Gas «Gubkin University», Leninsky ave., 65, bld 1, 119991, Moscow, Russian Federation, kpk@gubkin.pro

Анастасия Андреевна Фокина, магистрант, Российский государственный университет (НИУ) нефти и газа имени И.М. Губкина г. Москва, 119991, Ленинский пр-т, 65, корп. 1, fokina.a@gubkin.ru

Anastasia A. Fokina, Candidate for a Master's degree, National University of Oil and Gas «Gubkin University», Leninsky ave., 65, bld 1, 119991, Moscow, Russian Federation, fokina.a@gubkin.ru

Илья Вадимович Самарин, доктор технических наук, доцент, Российский государственный университет (НИУ) нефти и газа имени И.М. Губкина г. Москва, 119991, Ленинский пр-т, 65, корп. 1, ivs@gubkin.ru

Ilya V. Samarin, Dr. Sci. (Eng), Assistant professor, National University of Oil and Gas «Gubkin University», Leninsky ave., 65, bld 1, 119991, Moscow, Russian Federation, ivs@gubkin.ru

Наталья Сергеевна Макуренкова, начальник отдела по логистике и складскому хозяйству, АО «Газпром шельфпроект», г. Москва, 119071, Ленинский пр-т, 15А, makurenkova.ns@gazprom-shelfproject.ru

Natalya S. Makurenkova, Head of Logistics and Warehousing Department, Gazprom Shelfproject JSC, Leninsky ave., 15A, 119296, Moscow, Russian Federation, makurenkova.ns@gazprom-shelfproject.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.07.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.07.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 01.08.2023.

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS

Научная статья

УДК 532.526.2, 624.124

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.003>

Зависимость напряженно-деформированного состояния заснеженного ледяного покрова от глубины воды в условиях изгибно-гравитационного резонанса

В.М. Козин¹ kozinvictor@rambler.ru, В.Ю. Верещагин^{2,3} klirickv@yandex.ru

¹Институт машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, ²Новосибирский государственный технический университет, ³Новосибирский государственный педагогический университет

Аннотация. Представлен краткий обзор экспериментально-теоретических исследований по распространению изгибно-гравитационных волн (ИГВ) в ледяном покрове. Отмечено, что большие энергетические затраты на разрушение льда традиционными технологиями обуславливают необходимость поиска новых средств и методов решения ледотехнических задач, в том числе, исследований способности амфибийных судов на воздушной подушке (СВП) разрушать ледяной покров при их движении по льду со скоростью резонансных ИГВ резонансным методом, т.е. в условиях наступления изгибно-гравитационного резонанса (ИГР). Их преимуществами являются отсутствие непосредственного контакта судна со льдом (это повышает надежность их эксплуатации), проходимость над заснеженным и затороженным ледяным покровом, безопасность движения над подводными островами, битым льдом, возможность выхода со льда на чистую воду и наоборот, на необорудованный берег и пр. Отмечено, что на производительность резонансного метода влияют не только параметры СВП, но и условия ледовой обстановки, в том числе, заснеженность ледяного покрова и глубина воды. Представлены аналитические зависимости для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) ледяного покрова с наличием слоя снега, которое возникает под действием движущейся нагрузки в условиях ИГР. Приведены результаты расчетов зависимости амплитуды прогибов и напряжений в ледяном покрове от его параметров, снега и глубины воды. Установлено, что при выходе с глубокой воды на мелководье ледоразрушающую способность судов можно увеличить почти в 2 раза. На этом основании сделано заключение, что, если на акватории, где планируется выполнение ледокольных работ с использованием резонансного метода разрушения льда, имеются мелководные участки, то ледокольные работы следует начинать с них. Результаты предварительно выполненных данных исследований целесообразно продолжить для подтверждения их достоверности, например, путем проведения соответствующих экспериментов с последующей разработкой практических рекомендаций по их использованию.

Ключевые слова: ледяной покров, снег, резонансный метод разрушения льда, глубина воды, напряженно-деформированное состояние.

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

Для цитирования: Козин В.М., Верещагин В.Ю. Зависимость напряженно-деформированного состояния заснеженного ледяного покрова от глубины воды в условиях изгибно-гравитационного резонанса, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 26—35. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.003

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.003>

Dependence of the stress-strain state of the snow-covered ice cover on the water depth under conditions of flexural-gravitational resonance

Victor M. Kozin¹ kozinvictor@rambler.ru, Vladislav Yu. Vereshchagin^{2,3} klirickv@yandex.ru

¹Deformation of the Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, ²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation, ³Novosibirsk State pedagogical University, Novosibirsk, Russian Federation.

Abstract. A brief review of experimental and theoretical studies on the propagation of flexural gravity waves (IGWs) in the ice cover is presented. It is noted that the high energy costs for the destruction of ice by traditional technologies necessitate the search for new means and methods for solving ice engineering problems, including the ability of amphibious hovercraft (AHV) to destroy the ice cover when they move over ice at the speed of resonant IGWs by the resonance method, those. under conditions of onset of flexural-gravitational resonance (BGR). Their advantages are the lack of direct contact of the vessel with ice (this increases the reliability of their operation), patency over snow-covered and hummocked ice cover, safety of movement over underwater islands, broken ice, the ability to exit from ice to clear water and vice versa, to an unequipped shore, and etc. It is noted that the performance of the resonance method is affected not only by the parameters of the SVP, but also by the conditions of the ice situation, including the

snow content of the ice cover and the depth of the water. Analytical dependencies are presented for the analysis of the stress-strain state of the ice cover with the presence of a layer of snow, which occurs under the action of a moving load under the conditions of IGR. The results of calculations of the dependence of the amplitude of deflections and stresses in the ice cover on its parameters, snow and water depth are presented. It has been established that when leaving deep water for shallow water, the ice-breaking capacity of ships can be increased by almost 2 times. On this basis, it was concluded that if there are shallow water areas in the water area where it is planned to carry out icebreaking operations using the resonance method of ice destruction, then icebreaking operations should begin from them. It is advisable to continue the results of these preliminary studies to confirm their reliability, for example, by conducting appropriate experiments with the subsequent development of practical recommendations for their use.

Keywords: ice cover, snow, resonant method of ice destruction, water depth, stress-strain state.

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

For citation: Victor M. Kozin, Vladislav Yu. Vereshchagin, Dependence of the stress-strain state of the snow-covered ice cover on the water depth under conditions of flexural-gravitational resonance, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 1, P. 26—35. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.003

Введение

Большие энергетические затраты на разрушение льда традиционными технологиями (ледоколами, ледокольными приставками и пр.) и невозможность их использования в сложных ледовых условиях обуславливают необходимость поиска новых средств и методов решения ледотехнических задач. К их числу можно отнести и начавшаяся открытая сравнительно недавно способность амфибийных судов на воздушной подушке (СВП) разрушать ледяной покров

[1-4] при их движении по льду со скоростью резонансных изгибно-гравитационных волн (ИГВ) резонансным методом т.е. в условиях наступления ИГР [5].

Резонансный метод разрушения ледяного покрова (РМРЛ) может осуществляться любым транспортным средством, обладающим возможностью перемещаться по ледяному покрову с достаточной скоростью и создающим необходимую для разрушения льда нагрузку. Так, разрушение льда резонансными ИГВ наблюдалось при движении автомашин, танков, поездов по ледяным переправам, при использовании ледяного покрова в качестве взлетно-посадочных полос для самолетов и автомобильных трасс.

При решении ледотехнических задач на замерзающих водоемах с использованием резонансного метода необходимо возбуждать ИГВ значительной амплитуды. Для этого потребуются транспортные средства массой в десятки и сотни тонн и способные безопасно двигаться над льдом с большой скоростью. В настоящее время этим требованиям удовлетворяют только СВП. Кроме того, их вездеходные качества позволяют разрушать ледяной покров на акваториях любой глубины. Обладая большой скоростью, маневренностью и амфибийными свойствами, СВП могут быстро перемещаться в районы с ледовыми осложнениями. Преимуществами СВП являются также отсутствие непосредственного контакта судна со льдом (это повышает надежность их эксплуатации), проходимость над заснеженным и затороженным ледяным покровом, безопасность движения над подводными островами, битым льдом, возможность выхода со льда на чистую воду и наоборот, на необорудованный берег. Это позволяет решать ряд задач по продлению навигации на внутренних водных путях, использовать СВП для быстрого (с

резонансной скоростью 20-25 км/ч [6]) разрушения льда на больших площадях с целью более раннего вскрытия рек и водохранилищ. В периоды ледостава и ледохода для предотвращения разрушительных наводнений приходится разрушать ледяные заторы и зажоры. В этих случаях РМРЛ окажется более эффективным по сравнению с традиционными технологиями [6]. Очевидно, что на производительность резонансного метода будут влиять не только параметры СВП, но и условия ледовой обстановки, в том числе и глубина воды, т.к. при выходе на мелководье параметры ИГВ и их ледоразрушающая способность меняются [7] (см. рис. 1).



Рис. 1. Увеличение ледоразрушающей способности ИГВ при выходе судна на мелководье (судно выходит на берег)

Поскольку более 80% территории РФ в зимний период покрывается снежным покровом [8], то при проведении ледокольных работ резонансным методом движение СВП в условиях заснеженного ледяного покрова будет основным режимом. Влияние снежного покрова, лежащего на ледяной пластине при возбуждении во льду резонансных ИГВ от движущейся нагрузки, еще мало изучено, хотя оно должно быть существенным, т.к. его толщина может быть довольно значительной и достигать в бассейнах рек до 1,5 метров [9].

Краткий обзор экспериментально-теоретических исследований по распространению ИГВ в ледяном покрове

При изучении опыта использования ледяного покрова для транспортировки грузов с помощью

колесной и гусеничной техники было установлено, что при резонансной скорости движения прогибы льда возрастали в два раза [10]. Во время испытаний канадского СВП «Voyageur» были обнаружены его ледокольные качества, при этом на его резонансной скорости 6,2 м/с судно непрерывно разрушало ледяной покров толщиной 0,38 м [1]. На льду озера Дифенбекер при помощи датчиков вертикальных перемещений проведена серия экспериментов по записи профилей взволнованной поверхности льда толщиной от 0.50 до 0.73 м от движения транспортным средств [11]. В работе [12] опубликованы экспериментальные данные, полученные с помощью 1200 тензодатчиков. Они были установлены на расстоянии 1 км от взлетно-посадочной полосы, расположенной на морском льду пролива Макмердо. На озере Сарома (Хоккайдо, Япония) были проведены экспериментальные исследования по изучению деформаций ледяного покрова при движении по нему нагрузки. Автором с высокой точностью были записаны профили взволнованной поверхности льда [13]. В работе [14] исследовались режимы движения нагрузки по льду. Испытания проходили на озерах Канады при различных глубинах и толщинах льда от 0.4 до 0.6 м. Была установлена зависимость резонансной скорости движения нагрузки от ледовых условий. Также на озере Сарома были проведены дополнительные полевые испытания при наличии снежного покрова. В результате исследований были выявлены пять режимов деформирования ледяного покрова [13,15,16]. Эксперименты с использованием грузового автомобиля проводились вдоль ледяной дороги протяженностью 6 км. В процессе их выполнения исследованы вопросы поведения морского и озерного льда при действии на него движущихся нагрузок. Авторами выполнена серия экспериментов на антарктической станции McMurdo Sound, в которых сделаны записи деформаций ледяного покрова на различных расстояниях от ледовой трассы [17]. Для имитации воздействия самолета на естественный ледяной покров при его взлете и посадке была произведена серия полунатурных экспериментов с использованием двухместного мотодельтаплана [7].

Вынужденные колебания бесконечной упругой пластины на упругом основании винклеровского типа под действием гармонически изменяющейся во времени сосредоточенной силы рассмотрены в работе [18]. На примере плоских установившихся волн, возникающих в ледяном покрове от действия движущейся области поверхностных давлений, исследовано влияние неоднородностей ледяного покрова и жидкости на развитие волновых движений [19]. Вопросами влияния слоя снега на характеристики ледяного покрова посвящена работа [20]. Автор статьи [21] предложил использовать введение в дифференциальные уравнения колебаний ледяного покрова нелинейных членов, что позволило избежать неограниченный рост

амплитуды волны при резонансных скоростях движения нагрузки. Зависимости для расчёта НДС ледяного покрова в случае движения по нему нагрузки при разных граничных условиях на контуре ледяного поля и законах ее движения получены в работе [22]. В работах [23,24] рассмотрены вопросы дифракции поверхностных волн краем, плавающей упругой полубесконечной пластины для конечной и бесконечной глубины жидкости. Авторы работ [25, 26] исследовали стационарное и нестационарное движение нагрузок по ледяному покрову. Решения ряд прикладных задач динамики ледяного покрова приведены в работе [7]. Авторы [27] рассмотрели ряд задач динамики ледяного и снежного покровов. Решение распространения волн в прямоугольном канале конечной и малой глубины для ледяного покрова, прикрепленного к его стенкам, получено в работе [28]. Влияние физико-механических характеристик ледяной пластины, режимов взлета и посадки самолета на НДС ледяного покрова установлено в работе [29]. Авторами [30] исследована задача о распространении ИГВ в покрытом льдом канале прямоугольного сечения. В работе [31] исследовано влияние гидростатического и гидродинамического давлений на колебания ледяного покрова в канале под действием движущейся нагрузки. Поведение полубесконечного ледяного покрова при равномерном движении нагрузки рассмотрено в работе [32]. В рамках линейной теории исследовались установившиеся колебания ледяного покрова и жидкости, вызванные локальной областью периодического по времени давления [33]. В работах [34,35,23] решены задачи о взаимодействии поверхностных волн и ИГВ с вертикальной преградой, о поведении полубесконечного ледяного покрова на поверхности жидкости конечной глубины под действием нагрузки, движущейся с постоянной скоростью вдоль кромки покрова и по свободной поверхности жидкости. В работе [36] изучено влияние снежного покрова на распространение ИГВ, генерируемых в сплошном ледяном поле под действием периодической перемещающейся системы давлений и начальных деформаций.

Постановка задачи исследований

Рассматривается задача о деформировании бесконечной флотирующей ледяной пластины толщиной h и плотностью ρ_1 при движении по ней системы поверхностных давлений q со скоростью u . Предполагается, что вода – идеальная несжимаемая жидкость плотностью ρ_2 , движение жидкости потенциальное. Ледяной покров моделируется вязко – упругой, изначально ненапряженной изотропной пластиной покрытой слоем снега толщиной h_c с плотностью снежного покрова ρ_c [37]. Расчетная схема представлена на рис. 2.

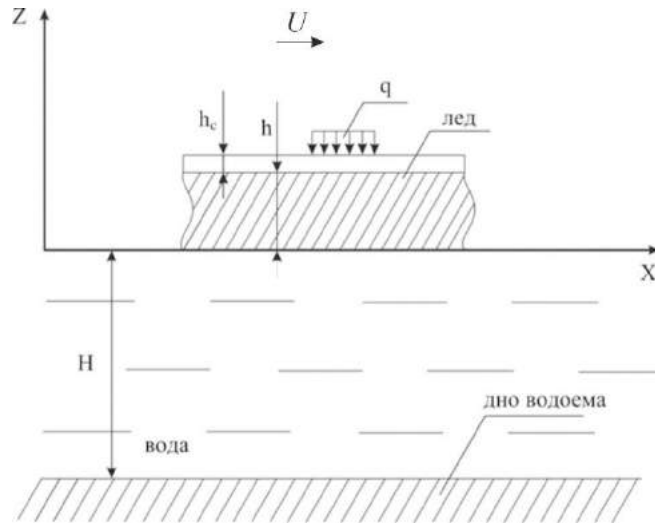


Рис. 2. Расчетная схема

Зависимости для определения НДС ледяного покрова с наличием снежного покрова

Уравнение малых колебаний плавающей вязко - упругой ледяной пластины с учетом влияния слоя снега получено в работе [38]:

$$\frac{G_m h^3}{3} \mathbf{Q} \nabla^4 w = \mathbf{P} \left(-q - \rho_2 g w - (\rho_1 h + \rho_c h_c) \frac{\rho_2 w}{\partial t^2} - \eta_c h_c \frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 w - \rho_2 w - \rho_2 \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=0} \right) \quad (1)$$

где:

$$\mathbf{P} = \tau_m^{-1} + \left(1 + \frac{G_m + \tau_k}{G_k} \right) \frac{\partial}{\partial t} + \tau_k \frac{\partial^2}{\partial t^2}; \quad \mathbf{Q} = \frac{\partial}{\partial t} + \tau_k \frac{\partial^2}{\partial t^2}$$

\mathbf{P} и \mathbf{Q} – линейные дифференциальные операторы, ρ_c - плотность снежного покрова; ρ_1 - плотность льда; ρ_2 - плотность воды; q - система поверхностных давлений; η_c - коэффициентом внутреннего трения снега; h_c – толщина снежного покрова; τ_m , τ_k времена релаксации для моделей Максвелла и Кельвина-Фойгта, G_m и G_k – соответствующие модули упругости при сдвиге, g – ускорение свободного падения; ∇ - оператор Набла; $G = E / 2(1 + \nu)$; E - модуль Юнга; ν - коэффициент Пуассона; K – модуль всестороннего сжатия; h – толщина льда; w – вертикальное перемещение льда и воды; $\phi = \phi(x, y, z, t)$ - функция потенциала скорости жидкости, удовлетворяющая уравнению Лапласа $\Delta \phi = 0$

Решение уравнения (1) получено в виде:

$$w(x, y) = \frac{q_0}{4\rho_2 u^2 \alpha_1 \alpha_2} \int_0^\infty \lambda^2 \tanh(\lambda H) \int_0^\lambda \cos(\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} y) \frac{\sin\left(\alpha \frac{L}{2}\right) \sin\left(\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \frac{L}{2\omega}\right)}{\sinh\left(\pi \frac{\alpha}{2\alpha_1}\right) \sinh\left(\pi \frac{\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}}{2\alpha_2}\right)} \times \left((\tau - \tau u \alpha) \cos(\alpha x) + \left(1 + \frac{G}{G} + \frac{\tau}{\tau} \right) u \alpha \sin(\alpha x) \right) \xi + \left((\tau - \tau u \alpha) \sin(\alpha x) - \left(1 + \frac{G}{G} + \frac{\tau}{\tau} \right) u \alpha \cos(\alpha x) \right) \eta \frac{d\alpha d\lambda}{\sqrt{\lambda - \alpha} (\xi + \eta)} \quad (2)$$

где:

$$\xi = -\frac{G h \alpha \lambda \tau \tanh(\lambda H)}{3\rho} + \tau \left(\frac{g \lambda \tanh(\lambda H)}{u} - \frac{\alpha \lambda (\rho H + \rho h) \tanh(\lambda H)}{\rho} - \alpha \right) + \left(1 + \frac{G}{G} + \frac{\tau}{\tau} \right) \frac{\eta h \alpha \lambda \tanh(\lambda H)}{\rho} + \tau \alpha \left(-g \lambda \tanh(\lambda H) + \frac{u \alpha \lambda (\rho h + \rho h) \tanh(\lambda H)}{\rho} + u \alpha \right),$$

$$\eta = -\frac{Gh\alpha\lambda \tanh(\lambda H)}{3\rho u} + \tau \frac{\eta h\alpha\lambda \tanh(\lambda H)}{u\rho} + \left(1 + \frac{G}{G} + \frac{\tau}{\tau}\right) \left(-\frac{\alpha g\lambda \tanh(\lambda H)}{u} + \frac{u\alpha\lambda(\rho h + \rho h)\tanh(\lambda H)}{\rho} + u\alpha\right) - \tau \frac{u\alpha\eta h\lambda \tanh(\lambda H)}{\rho}.$$

Изгибные и касательные напряжения вычислялись по зависимостям:

$$\sigma_{x \max}^0 = \pm \frac{6M_x}{h^2};$$

$$\sigma_{y \max}^0 = \pm \frac{6M_y}{h^2};$$

$$\tau_{xy \max}^0 = \pm \frac{6M_{xy}}{h^2}.$$

где:

$$M_x = D \cdot \frac{q_0}{4\rho_2 u^2 \alpha_1 \alpha_2} \int_0^\infty \lambda^2 \tanh(\lambda h) \int_0^\lambda (\alpha^2 + \nu(\lambda^2 - \alpha^2)) \cdot \cos(\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot y) \times \\ \times \frac{\sin\left(\alpha \cdot \frac{L}{2}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot \frac{L}{2\omega}\right)}{\sinh\left(\pi \cdot \frac{\alpha}{2a_1}\right) \cdot \sinh\left(\pi \cdot \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot \frac{1}{2\alpha_2}\right)} \times \\ \times \left[\frac{\left[(\tau_m^{-1} - \tau_k u^2 \alpha^2) \cdot \cos(\alpha x) + \left(1 + \frac{G_m}{G_k} + \frac{\tau_k}{\tau_m}\right) \cdot u \cdot \alpha \cdot \sin(\alpha x) \right] \cdot \xi +}{\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot (\xi^2 + \eta^2)} + \right. \\ \left. + \frac{\left[(\tau_m^{-1} - \tau_k u^2 \alpha^2) \cdot \sin(\alpha x) - \left(1 + \frac{G_m}{G_k} + \frac{\tau_k}{\tau_m}\right) \cdot u \cdot \alpha \cdot \cos(\alpha x) \right] \cdot \eta}{\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot (\xi^2 + \eta^2)} \right] d\alpha d\lambda;$$

$$M_y = D \cdot \frac{q_0}{4\rho_2 u^2 \alpha_1 \alpha_2} \int_0^\infty \lambda^2 \tanh(\lambda h) \int_0^\lambda (\lambda^2 - \alpha^2 + \nu \cdot \lambda^2) \cdot \cos(\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot y) \times \\ \times \frac{\sin\left(\alpha \cdot \frac{L}{2}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot \frac{L}{2\omega}\right)}{\sinh\left(\pi \cdot \frac{\alpha}{2a_1}\right) \cdot \sinh\left(\pi \cdot \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot \frac{1}{2\alpha_2}\right)} \times \\ \times \left[\frac{\left[(\tau_m^{-1} - \tau_k u^2 \alpha^2) \cdot \cos(\alpha x) + \left(1 + \frac{G_m}{G_k} + \frac{\tau_k}{\tau_m}\right) \cdot u \cdot \alpha \cdot \sin(\alpha x) \right] \cdot \xi +}{\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot (\xi^2 + \eta^2)} + \right. \\ \left. + \frac{\left[(\tau_m^{-1} - \tau_k u^2 \alpha^2) \cdot \sin(\alpha x) - \left(1 + \frac{G_m}{G_k} + \frac{\tau_k}{\tau_m}\right) \cdot u \cdot \alpha \cdot \cos(\alpha x) \right] \cdot \eta}{\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot (\xi^2 + \eta^2)} \right] d\alpha d\lambda;$$

$$M_{xy} = D \cdot (1-\nu) \cdot \frac{q_0}{4\rho_2 u^2 \alpha_1 \alpha_2} \int_0^\infty \lambda^2 \tanh(\lambda h) \int_0^\lambda \alpha \cdot \sin(\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot y) \cdot \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \times$$

$$\times \frac{\sin\left(\alpha \cdot \frac{L}{2}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot \frac{L}{2\omega}\right)}{\sinh\left(\pi \cdot \frac{\alpha}{2\alpha_1}\right) \cdot \sinh\left(\pi \cdot \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot \frac{1}{2\alpha_2}\right)} \times$$

$$\times \left[\frac{\left[-\left(\tau_m^{-1} - \tau_k u^2 \alpha^2\right) \cdot \sin(\alpha x) + \left(1 + \frac{G_m}{G_k} + \frac{\tau_k}{\tau_m}\right) \cdot u \cdot \alpha \cdot \cos(\alpha x) \right] \cdot \xi +}{\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot (\xi^2 + \eta^2)} \right.$$

$$\left. + \frac{\left[\left(\tau_m^{-1} - \tau_k u^2 \alpha^2\right) \cdot \cos(\alpha x) + \left(1 + \frac{G_m}{G_k} + \frac{\tau_k}{\tau_m}\right) \cdot u \cdot \alpha \cdot \sin(\alpha x) \right] \cdot \eta}{\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot (\xi^2 + \eta^2)} \right] d\alpha d\lambda.$$

Моменты, действующие в сечениях, нормальных к осям x и y , и приходящиеся на единицу длины сечения:

$$M_x = -D \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(w + \tau_f \frac{\partial w}{\partial t} \right) + \nu \cdot \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(w + \tau_f \frac{\partial w}{\partial t} \right) \right)$$

$$M_y = -D \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(w + \tau_f \frac{\partial w}{\partial t} \right) + \nu \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(w + \tau_f \frac{\partial w}{\partial t} \right) \right)$$

$$M_{xy} = D(1-\nu) \cdot \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(w + \tau_f \frac{\partial w}{\partial t} \right)$$

Где: $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ - цилиндрическая жесткость,

τ_f - время релаксации деформаций; E – модуль Юнга; ν - коэффициент Пуассона; h – толщина льда

Результаты расчетов НДС ледяного покрова

В большинстве известных расчетов предельных нагрузок, разрушающих ледяной покров при их движении, используется уровень нормальных изгибных напряжений. При этом ледяной покров считается разрушенным, если они превышают соответствующий предел прочности. Это

подтверждают и результаты выполненных экспериментов в натуральных условиях. В ходе их проведения с крупномасштабными моделями СВП в условиях ИГР магистральные раскрытые трещины в ледяном покрове (см. рис. 3) возникали преимущественно в направлении перпендикулярном направлению движения нагрузки, т.е. при возникновении максимальных $\sigma_{x(max)}$ [6].

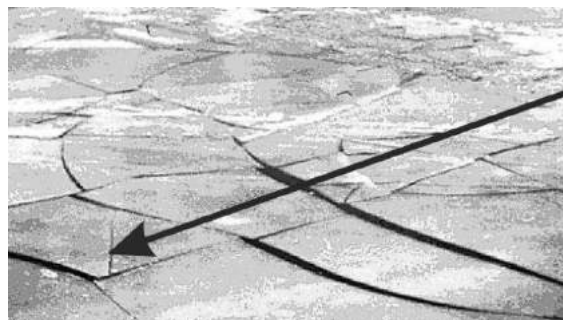


Рис. 3. Характер разрушения ледяного покрова при возникновении $\sigma_{x(max)}$ где: стрелкой показано направление движения модели СВП.

Учитывая выше сказанное, результаты расчетов напряжений по вышеперечисленным зависимостям были проведены для СВП «Мурена» с наличием снежного покрова $h_c = 0,5$ м и следующих исходных данных: $q = 3330$ Па; $2a = 30$ м; $2b = 13$ м; $u = 5,6$ м/с; $\rho_b = 900$ кг/м³; $\rho_l = 1000$ кг/м³; $\tau_f = 10$ с; $\mu = 1/3$; $E = 5$ ГПа; $h = 0,5$ м; $H = 5$ м. представлены на рис. 4.

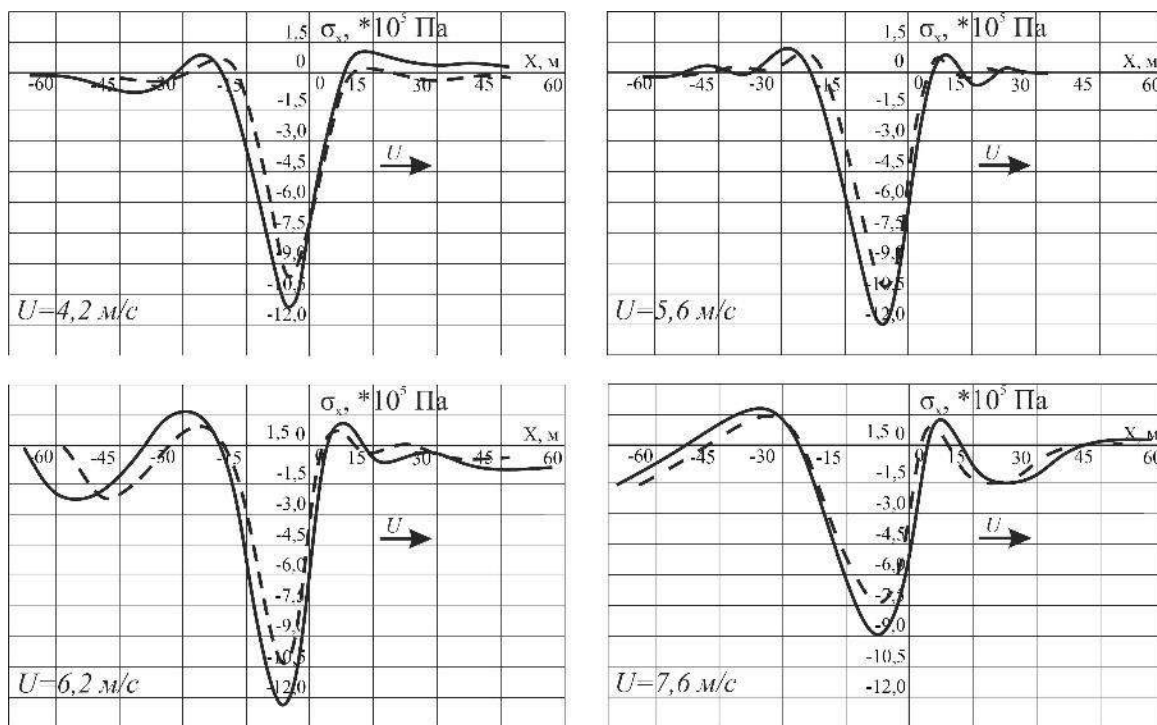


Рис. 4. График напряжений σ_x в ледяной пластине при $H=5$ м и разных скоростях нагрузки (где: — без снежного покрова, --- $h_c=0,5$ м)

Кривые зависимостей абсолютных максимальных напряжений $\sigma_{x(max)}$ при резонансных скоростях для H (5 – 40) м и толщине снежного покрова $h_c=0,5$ м представлены на рисунке 5.

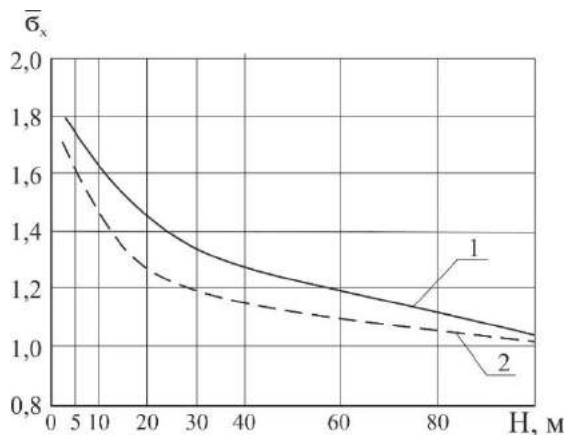


Рис. 5. Зависимость относительных максимальных напряжений от глубины акватории при толщине снежного покрова $h_c=0,5$ м (1- без снежного покрова; 2- при $h_c=0,5$ м)

где: $\bar{\sigma}_x = \sigma_{xsp} / \sigma_{\infty}$, σ_{∞} – напряжения при

бесконечной глубине водоема, σ_{xsp} – напряжения с учетом снежного покрова.

Заключение

На основании выполненных расчетов для реальных ледовых условий, при которых могут эксплуатироваться существующие и перспективные СВП при реализации резонансного метода

разрушения ледяного покрова с целью решения различных ледотехнических задач, возникает необходимость существенно корректировать известные зависимости для определения их ледоразрушающей способности [39]. Так, даже при неизменной глубине воды равной, например, 5 м наличие снежного покрова толщиной 0,5 м при такой же толщине льда снижает изгибные напряжения в условиях изгибно-гравитационного резонанса до 15%. Поскольку энергия на разрушение льда зависит в квадратичной степени от напряжений [37], то это потребует существенных уточнений при определении ледоразрушающей способности СВП. Еще в большей степени на НДС ледяного покрова, как показывают расчеты, влияет глубина водоема. При выходе с глубокой воды на мелководье ледоразрушающую способность судов можно увеличить почти в 2 раза. Из этого следует, что, если на акватории, где планируется выполнение ледокольных работ с использованием резонансного метода разрушения льда, имеются мелководные участки, то ледокольные работы следует начинать с них. После образования на этих участках свободной кромки льда область разрушения ледяного покрова значительно проще расширить с меньшими энергозатратами, т.к. несущая способность ледяного покрова при наличии в нем раскрытых трещин, майн или открытых участков воды существенно, а иногда и в несколько раз, снижают его несущую способность. Таким образом, результаты предварительно выполненных данных исследований целесообразно продолжить для подтверждения их достоверности, например путем проведения соответствующих экспериментов, с последующей разработкой практических рекомендаций по их использованию.

Литература

1. Duffild D.O., Dickins D.E. Icebreakers trials with Bell Acrospace Voyager ACV. Canadian Aeronautics and space journal, 1974, vol. 20, n 10, p.471-474.
2. Wade R.J. Air Cushion technology in Icebreaking -Hoverig Graft and Hydrofoil, 1975, vol. 14, № 8, p. 20-23.,
3. Wade R.J., Edwards R.Y., Kim J.K. Improvements in icebreaking by use of air cushion technology.Symposium Calgary, 1976, № 10, p. 1-14.
4. Зуев В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях. Л.: Судостроение. 1986. 208 с.
5. Козин В.М., Земляк В.Л. Физические основы разрушения ледяного покрова резонансным методом. Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, ПГУ им. Шолом-Алейхема, АмГПУ. 2013. 250 с.
6. Козин В.М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова: Изобретения и эксперименты. М.: Академия естествознания. 2007. 355 с. ISBN 978-5-7692-1687-9
7. Козин В.М. Погорелова А.В., Жёсткая В.Д., Чижумов С.Д., Джабраилов М.Р. Морозов В.С., Кустов А.Н. Прикладные задачи динамики ледяного покрова. М.: Академия естествознания. 2008. 329 с.
8. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. – Москва, 2023. –104 стр.
9. Осокин Н.И. Сосновский А.В. Пространственная и временная изменчивость толщины и плотности снежного покрова на территории России //Лёд и Снег, 2014 № 4 (128), с. 72-80.
10. Gold L.W. Use of ice covers for transportation // Canadian Geotechnical Journal. 1971. Vol. 4. P. 170-181.
11. Eyre D. The flexural motion of a floating ice sheet induced by moving vehicles // Journal of Glaciology. 1977. Vol. 19. P. 555-570.
12. Goodman D., Holdsworth R. Continuous surface strain measurements on sea ice and on Erebus Glacier Tongue, McMurdo Sound, Antarctica // Antarctic Journal of the United States. 1978. Vol. 13. P. 67-70.
13. Takizawa T. Field studies on a response of a floating sea ice sheet to a steadily moving load // Contributions from the Institute of Low Temperature Science. 1987. Vol. 36. P. 31-76.
14. Beltaos S. Field studies on the response of floating ice sheets to moving loads // Canadian Journal of Civil Engineering. 1981. Vol. 8. P. 1-8.
15. Takizawa T. Deflection of a floating sea ice sheet induced by a moving load // Cold Regions Sci. and Techn. 1985. Vol. 11. P. 171–180.
16. Takizawa T. Response of a floating sea ice sheet to a steadily moving load // Journal of Geophysical Research. 1988. Vol. 93. P. 5100-5112.
17. Squire V., Hosking R., Kerr A., Langhorne P. Moving Loads on Ice Plates // Kluwer Academic Publishers. 1996. P. 86-94.
18. Jen D.H., Tang S.C. On the Vibration of an Elastic Plate on an Elastic Foundation // J. Sound Vib. 1971. No. 14(1). P. 81–89.
19. Доценко С.Ф. О влиянии неоднородности жидкости и ледяного покрова на волны, генерируемые движущейся областью давлений // Морские гидрофизические исследования. Севастополь: Изд-во МГИ АН УССР. 1974. №4 (67). С. 82–89.
20. Богородский В.В., Гаерило В.П. Лёд. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеиздат. 1980. 384 с.
21. Марченко А.В. Изгибно-гравитационные волны // Динамика волн на поверхности жидкости. М.: Наука. 1999. С. 65–111.
22. Жёсткая В.Д., Козин В.М. Исследования возможностей разрушения ледяного покрова амфибийными судами на воздушной подушке резонансным методом. Владивосток: Дальнаука. 2003. 161 с.
23. Ткачёва Л.А. Плоская задача о дифракции поверхностных волн на упругой плавающей пластине // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2003. №3. С. 131–149.
24. Ткачёва Л.А. Поведение плавающей упругой пластины при колебаниях участка дна // ПМТФ. 2005. Т. 46. № 2. С. 98–108.
25. Milinazzo F., Shinbrot M., Evans N.W. A mathematical analysis of the steady response of floating ice to the uniform motion of a rectangular load // Journal of Fluid Mechanics. 1995. P. 287-295.
26. Wang K. Hosking R., Milinazzo F. Time-dependent response of a floating viscoelastic plate to an impulsively started moving load // J. Fluid Mech. 2004. Vol. 521. P. 295–317.
27. Коробкин А.А., Папин А.А., Хабахпашева Т.И. Математические модели снежно-ледового покрова. Изд-во: Алтайский государственный университет (Барнаул). 2013. 116 с.
28. Korobkin A., Khabakhpasheva T., Papin A. Waves Propagating Along a Channel with Ice Cover // European Journal of Mechanics - B/Fluids. 2014. Vol. 47. P. 166-175.
29. Погорелова А.В., В.М. Козин, Матюшина А.А. Исследование напряженно-деформированного состояния ледяного покрова при взлете и посадке на него самолета // ПМТФ. 2015. Т.56. №5. С. 214-221.
30. Батяев Е.А., Хабахпашева Т.И. Гидроупругие волны в канале со свободным ледовым покровом // Известия Российской Академии наук. Механика жидкости и газа. М.: Наука. 2015. №6. С. 71-88.
31. Шишмарев К.А., Хабахпашева Т.И., Коробкин А.А. Влияние гидростатического и гидродинамического давлений на колебания ледового покрова // МАК-2015: "Математики - Алтайскому краю". Сборник трудов всероссийской конференции по математике. 2015. С. 87-91.
32. Ткачева Л.А. Поведение полубесконечного ледяного покрова при равномерном движении нагрузки // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т.59. №2. С. 82-98.
33. Стурова И.В., Ткачева Л.А. Колебания ограниченного ледяного покрова при локальном динамическом воздействии // Полярная Механика – 2016. №3. С. 997-1007.

34. Ткачева Л.А. Взаимодействие поверхностных и изгибно-гравитационных волн в ледяном покрове с вертикальной стенкой // ПМТФ. 2013. Т.54. №4. С. 158-170.
35. Ткачева Л.А. Волновые явления, возникающие при движении нагрузки по свободной поверхности жидкости вдоль кромки ледяного покрова // Прикладная механика и техническая физика. 2019. №3. 2019. С. 73-84.
36. Букатов А.Е. Волны в море с плавающим ледяным покровом. Севастополь: ФГБУН МГИ, 2017. 360 с.
37. Хейсин Д.Е. Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеоиздат. 1967. 215 с.
38. Козин В.М., Земляк В.Л., Верещагин В.Ю. Влияние снежного покрова на параметры изгибно-гравитационных волн в ледяном покрове. // ПМТФ. 2013. Т. 54, № 3. С. 134-140].
39. Козин В.М. Результаты экспериментально-теоретических исследований возможностей резонансного метода разрушения ледяного покрова. Известия РАН. МТТ. 2023, № 3, с. 3-20.

References

1. Dutfild D.O., Dickins D.E. Icebreakers trials with Bell Acrospace Voyager ACV. Canadian Aeronautics and space journal, 1974, vol. 20, n 10, p.471-474.
2. Wade R.J. Air Cushion technology in Icebreaking -Hoverig Graft and Hydrofoil, 1975, vol. 14, № 8, p. 20-23.,
3. Wade R.J., Edwards R.Y., Kim J.K. Improvements in icebreaking by use of air cushion technology.Symposium Calgary, 1976, № 10, p. 1-14.
4. Zuev V.A. Sredstva prodleniya navigatsii na vnutrennikh vodnykh putyakh. L.: Sudostroenie. 1986. 208 p.
5. Kozin V.M., Zemlyak V.L. Fizichesie osnovy razrusheniya ledyanogo pokrova rezonansnym metodom. Komsomol'sk-na-Amure: IMIM DVO RAN, PGU im. Sholom-Aleikhema, AMGPGU. 2013. 250 p.
6. Kozin V.M. Rezonansnyi metod razrusheniya ledyanogo pokrova: Izobreteniya i ehksperimenty. M.: Akademiya estestvoznaniya. 2007. 355 p. ISBN 978-5-7692-1687-9
7. Kozin V.M., Zhestkaya V.D., Pogorelova A.V., Chizhiumov S.D., Dzhabrailov M.R., Morozov V.S., Kustov A.N. Prikladnye zadachi dinamiki ledyanogo pokrova. M.: Izdatel'stvo «Akademiya EstestvoznaniYA». 2008. 329 p.
8. Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2022 god. – Moskva, 2023. –104 p.
9. Osokin N.I Sosnovskii A.V. Prostranstvennaya i vremennaya izmenchivost' tolshchiny i plotnosti snezhnogo pokrova na territorii Rossii //Led i Sneg, 2014 № 4 (128), P. 72-80.
10. Gold L.W. Use of ice covers for transportation // Canadian Geotechnical Journal. 1971. Vol. 4. P. 170-181.
11. Eyre D. The flexural motion of a floating ice sheet induced by moving vehicles // Journal of Glaciology. 1977. Vol. 19. P. 555-570.
12. Goodman D., Holdsworth R. Continuous surface strain measurements on sea ice and on Erebus Glacier Tongue, McMurdo Sound, Antarctica // Antarctic Journal of the United States. 1978. Vol. 13. P. 67-70.
13. Takizawa T. Field studies on response of a floating sea ice sheet to a steadily moving load // Contributions from the Institute of Low Temperature Science. 1987. Vol. 36. P. 31-76.
14. Beltaos S. Field studies on the response of floating ice sheets to moving loads // Canadian Journal of Civil Engineering. 1981. Vol. 8. P. 1-8.
15. Takizawa T. Deflection of a floating sea ice sheet induced by a moving load // Cold Regions Sci. and Techn. 1985. Vol. 11. P. 171-180.
16. Takizawa T. Response of a floating sea ice sheet to a steadily moving load // Journal of Geophysical Research. 1988. Vol. 93. P. 5100-5112.
17. Squire V., Hosking R., Kerr A., Langhorne P. Moving Loads on Ice Plates // Kluwer Academic Publishers. 1996. P. 86-94.
18. Jen D.H., Tang S.C. On the Vibration of an Elastic Plate, on an Elastic Foundation // J. Sound Vib. 1971. No. 14(1). P. 81-89.
19. Dotsenko S.F. O vliyani neodnorodnosti zhidkosti i ledyanogo pokrova na volny, generiruemye dvizhushcheisya oblast'yu davlenii // Morskie gidrofizicheskie issledovaniya. Sevastopol': Izd-vo MGI AN USSR. 1974. №4 (67). P. 82-89.
20. Bogorodskii V.V., Gavriilo V.P. Led. Fizicheskie svoistva. Sovremennye metody glyatsiologii. L: Gidrometeoizdat. 1980. 384 p.
21. Marchenko A.V. Izgibno-gravitatsionnye volny // Dinamika voln na poverkhnosti zhidkosti. M.: Nauka. 1999. P. 65-111.
22. Zhestkaya V.D., Kozin V.M. Issledovaniya vozmozhnostei razrusheniya ledyanogo pokrova amfibiinymi sudami na vozdushnoi podushke rezonansnym metodom. Vladivostok: Dal'nauka. 2003. 161 p.
23. Tkacheva L.A. Ploskaya zadacha o difraktsii poverkhnostnykh voln na uprugoi plavayushchei plastine // Izv. RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza. 2003. №3. P. 131-149.
24. Tkacheva L.A. Povedenie plavayushchei uprugoi plastiny pri kolebaniyakh uchastka dna // PMTF. 2005. Т. 46. № 2. P. 98-108.
25. Milinazzo F., Shinbrot M., Evans N.W. A mathematical analysis of the steady response of floating ice to the uniform motion of a rectangular load // Journal of Fluid Mechanics. 1995. P. 287-295.
26. Wang K. Hosking R., Milinazzo F. Time-dependent response of a floating viscoelastic plate to an impulsively started moving load // J. Fluid Mech. 2004. Vol. 521. P. 295-317.
27. Korobkin A.A., Papin A.A., Khabakhpasheva T.I. Matematicheskie modeli snezhno-ledovogo pokrova. Izd-vo: Altaiskii gosudarstvennyi universitet (Barnaul). 2013. 116 p.
28. Korobkin A., Khabakhpasheva T., Papin A. Waves Propagating Along a Channel with Ice Cover // European Journal of Mechanics - B/Fluids. 2014. Vol. 47. P. 166-175.
29. Pogorelova A.V., V.M. Kozin, Matyushina A.A. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya ledyanogo pokrova pri vzlete i posadke na nego samoleta // PMTF. 2015. Т.56. №5. P. 214-221.

30. Batyaev E.A., Khabakhpasheva T.I. Gidrouprugie volny v kanale so svobodnym ledovym pokrovom // Izvestiya Rossiiskoi Akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza. M.: Nauka. 2015. №6. P. 71-88.
31. Shishmarev K.A., Khabakhpasheva T.I., Korobkin A.A. Vliyanie gidrostaticheskogo i gidrodinamicheskogo davlenii na kolebaniya ledovogo pokrova // MAK-2015: "Matematiki - Altaiskomu krayu". Sbornik trudov vserossiiskoi konferentsii po matematike. 2015. P. 87-91.
32. Tkacheva L.A. Povedenie plavayushchei uprugoi plastiny pri kolebaniyakh uchastka dna // PMTF. 2005. T. 46. № 2. P. 98–108.
33. Sturova I.V., Tkacheva L.A. Kolebaniya ogranichennogo ledyanogo pokrova pri lokal'nom dinamicheskom vozdeistvii // Polyarnaya Mekhanika – 2016. №3. P. 997-1007.
34. Tkacheva L.A. Vzaimodeistvie poverkhnostnykh i izgibno-gravitatsionnykh voln v ledyanom pokrove s vertikal'noi stenкой // PMTF. 2013. T.54. №4. P. 158-170.
35. Tkacheva L.A. Volnovye yavleniya, vznikayushchie pri dvizhenii nagruzki po svobodnoi poverkhnosti zhidkosti vdol' kromki ledyanogo pokrova // Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. 2019. №3. 2019. P. 73-84.
36. Bukatov A.E. Volny v more s plavayushchim ledyanym pokrovom. Sevastopol': FGBUN MGI, 2017. 360 p.
37. Kheisin D.E. Dinamika ledyanogo pokrova. L.: Gidrometeoizdat. 1967. 215 p.
38. Kozin V.M., Zemlyak V.L., Vereshchagin V.YU. Vliyanie snezhnogo pokrova na parametry izgibno-gravitatsionnykh voln v ledyanom pokrove. // PMTF. 2013. T. 54, № 3. P. 134-140].
39. Kozin V.M. Rezul'taty ehksperimental'no-teoreticheskikh issledovaniy vozmozhnostei rezonansnogo metoda razrusheniya ledyanogo pokrova. Izvestiya RAN. MTT. 2023, № 3, P. 3-20.

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

Виктор Михайлович Козин, доктор технических наук, профессор, профессор по кафедре кораблестроения, главный научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий Института машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук 681005, Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов 1, e-mail: kozinvictor@rambler.ru

Victor M. Kozin, Dr.Sci.Tech, Professor at the Department of Shipbuilding, Chief Researcher of the Laboratory for the Problems of Creation and Processing of Materials and Products of the Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences 681005, Komsomolsk-on-Amur, st. Metallurgov 1, e-mail: kozinvictor@rambler.ru

Владислав Юрьевич Верещагин, ст. преподаватель кафедры «Технология машиностроения» Новосибирского государственного технического университета 630073, Новосибирск, ул. Карла Маркса 20, e-mail: klirickv@yandex.ru

Vladislav Yu. Vereshchagin, assistant professor Department of Technology of Mechanical Engineering, Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, st Karla Marksa 20, e-mail: klirickv@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 13.06.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 25.07.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 31.07.2023.

Научная статья

УДК 621.542

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.004>

Разработка турбопривода для быстроходных ручных шлифовальных пневматических машин повышенной мощности

Ю.П. Кузнецов¹ inturbo@yandex.ru, С.Н. Хрунков¹ khrunkov@nntu.ru,
А.Б. Чуваков¹ tchouvakov@mail.ru, Р.А. Погодин¹ rpogodin@yandex.ru

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

Аннотация. Статья посвящена решению задачи создания турбопривода для быстроходных ручных шлифовальных пневматических машин повышенной мощности. Основным элементом турбопривода является инновационная турбина, состоящая из двух радиальных ступеней, лопаточные венцы которых размещены на противоположных боковых поверхностях диска рабочего колеса. Со стороны подвода сжатого воздуха размещены сопловые лопатки центробежной реактивной турбины, со стороны выхода потока – рабочие лопатки центростремительной активной турбины. Промежуточный направляющий аппарат охватывает лопаточные венцы по периферии. В турбоприводе, предназначенном для относительно тихоходных машин, применена турбина с двумя ступенями давления. В состав турбопривода также входят регулятор частоты вращения и устройство автоматического торможения ротора. Испытания подтвердили соответствие мощности разработанных турбин рассчитанным целевым показателям. На базе разработанного турбопривода была спроектирована модельная линия прямых и угловых машин, предназначенная для выполнения широкого спектра шлифовальных работ.

Ключевые слова: Пневматическая шлифовальная машина, турбопривод, радиальная турбина, рабочее колесо, сопловой аппарат, рабочие лопатки, регулятор частоты вращения, уплотнения, покрывной диск.

Для цитирования: Кузнецов Ю.П., Хрунков С.А., 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. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.004

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.004>

Development of a turbine drive for manual pneumatic grinding tools of increased power

Yuriy P. Kuznetsov¹ e-mail: inturbo@yandex.ru, Sergey N. Khrunkov¹ khrunkov@nntu.ru,
Aleksandr B. Chuvakov¹ tchouvakov@mail.ru, Roman A. Pogodin¹ rpogodin@yandex.ru

¹R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. The paper is devoted to solving the problem of creating a turbine drive for high-speed manual pneumatic grinding machines of increased power. The main element of the turbine drive is an innovative turbine consisting of two radial stages, the blade crowns of which are placed on opposite side surfaces of the impeller disk. The nozzle blades of a centrifugal jet turbine are located on the compressed air supply side, and the working blades of a centripetal active turbine are located on the flow outlet side. The fixed guide blades cover these blade crowns on the periphery. A second pressure stage has been added to the turbine drive designed for relatively slow-rotating machines. Turbine drive also includes a speed controller and an automatic rotor braking device. The tests confirmed the compliance of the power of the developed turbines with the calculated target indicators. Based on the developed turbine drive, a model line of straight and angular machines was designed to perform a wide range of grinding operations.

Keywords: Pneumatic grinding machine, turbine drive, radial turbine, impeller, nozzle device, working blades, speed controller, seals, cover disk.

For citation: Yuriy P. Kuznetsov, Sergey N. Khrunkov, Aleksandr B. Chuvakov, Roman A. Pogodin, Development of a turbine drive for manual pneumatic grinding tools of increased power, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 1, P. 36—42. DOI:10.37220/MIT.2023.61.3.004

Постановка задачи

Ручные шлифовальные пневматические машины широко применяются в судостроении для зачистки сварных швов, притупления острых кромок, подготовки фасок под сварку, обработки фасонных поверхностей, удаления грата и облоя на литье.

В настоящее время большинство шлифовальных машин выпускается с ротационными приводами, которые характеризуются относительно большой массой и высокими уровнями шума и вибрации. Трение лопастей в процессе работы о внутреннюю

поверхность статора, требует постоянной подачи распыленной смазки в двигатель и ограничивает возможность повышения частоты вращения ротора вследствие быстрого износа лопастей. Кроме того, в ротационных приводах невозможно одновременное увеличение мощности и частоты вращения ротора, что затрудняет их использование в мощных высокооборотных машинах.

Турбоприводы свободны от указанных выше недостатков, однако их использование в ручных шлифовальных машинах ограничено в первую очередь, из-за того, что рабочая частота вращения

турбины, обеспечивающая оптимальное отношение окружной скорости лопаток рабочего колеса (РК) к скорости истечения потока газа из сопел (У/С), существенно превышает максимально допустимую частоту вращения шлифовального круга [1,2]. Быстроходные ручные шлифовальные пневматические машины повышенной мощности, способные существенно повысить производительность шлифования и качество обрабатываемых поверхностей, в настоящее время практически не выпускаются [3]. Ключом к созданию класса таких машин является использование инновационного малоразмерного турбопривода, который способен обеспечить приемлемую эффективность при пониженных значениях отношении скоростей У/С. Рассмотрим основные аспекты решения данной задачи.

1. Применение турбоприводов в ручных шлифовальных машинах

Ручные шлифовальные машины с турбоприводами различного типа выпускаются рядом известных фирм – производителей пневмоинструмента. Фирма Air Turbine Tools выпускает линейку прямых машин с приводной центробежной реактивной турбиной типа «сегнерово колесо» (рис. 1, а). Машины компактны и технологичны, однако их применение ограничено весьма низкими КПД приводной турбины и крутящим моментом на роторе. В прямых машинах фирмы Дераг применяются осевые турбины с одной или двумя ступенями скорости (рис. 1, б). Машины достаточно эффективны, но имеют высокую стоимость, обусловленную низкой технологичностью осевых турбин.

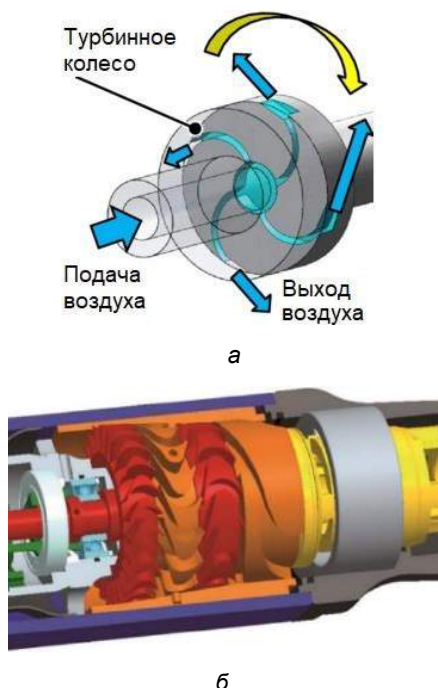


Рис. 1. Турбины ручных шлифовальных машин

В силу указанных причин турбоприводы не получили широкого распространения в прямых шлифовальных машинах. В угловых шлифовальных машинах, выпускаемых такими известными фирмами, как Deprag, Atlas Copco, Ingersoll Rand,

Lukas и др., турбоприводы, напротив, широко используются вследствие их безальтернативности в области мощностей более 3 кВт.

2. Турбоприводы высокоскоростных шлифовальных машин повышенной мощности

2.1. Турбина базовой конструктивной схемы

Задача создания эффективных и технологичных турбин с пониженным оптимальным отношением скоростей У/С была решена путем применения многоступенчатых радиальных турбин, выполненных на базе рабочего колеса (РК) с центробежным и центростремительным лопаточными венцами, размещенными на двух сторонах единого диска.

В разработанных прямых и угловых машинах турбоприводы выполнены по общей конструктивной схеме (рис. 2), в состав которой входят радиальная турбина 1 и регулятор частоты вращения 2. Подвод сжатого воздуха к турбине осуществляется через осевую расточку вала и уплотнен с помощью узла 3. Все машины снабжены устройством автоматического торможения ротора 4. Рассмотрим состав и принцип действия упомянутых и некоторых других элементов машин.

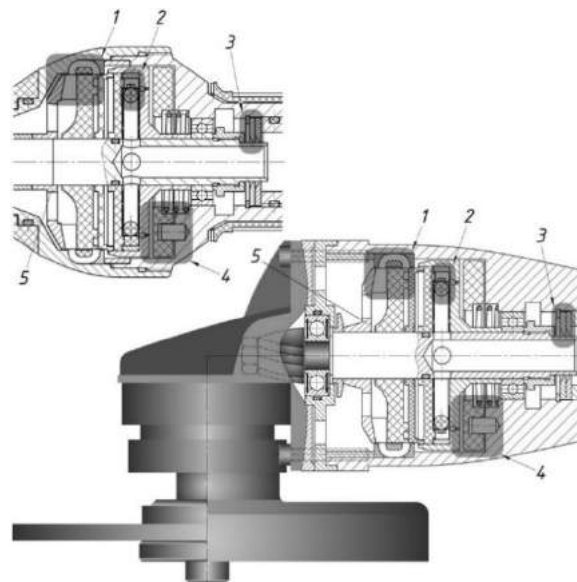


Рис. 2. Турбины базовой конструктивной схемы

1 – радиальная двухступенчатая турбина; 2 – регулятор частоты вращения; 3 – узел уплотнения подвода воздуха к валу; 4 – устройство автоматического торможения ротора; 5 – покрывной диск рабочих лопаток

В качестве привода машин применена двухступенчатая турбина (поз. 1 на рис. 2), состоящая из двух радиальных турбинных ступеней, лопаточные венцы которых размещены на противоположных боковых поверхностях РК [4, 5] (рис. 3). Со стороны подвода сжатого воздуха на РК размещены сопловые лопатки 2 центробежной реактивной турбины типа «сегнерово колесо», со стороны выхода потока – рабочие лопатки 3 центростремительной активной турбины.

Промежуточный направляющий аппарат (ПНА) 1 охватывает лопаточные венцы по периферии. Во время работы турбопривода воздух расширяется в сопловых лопатках 2. В ПНА 1 поток воздуха изменяет направление движения с центробежного на

центростремительное и приобретает требуемую тангенциальную закрутку во входном сечении центростремительной активной турбины. Передав ротору оставшуюся часть энергии в рабочих лопатках 3 воздух выходит в атмосферу. Характеристика инновационной турбины занимает промежуточное положение между характеристиками осевых активных турбин: одноступенчатой турбины (оптимальное $U/C=0,5$) и турбины с двумя ступенями скорости (оптимальное $U/C=0,25$); аналитически установлено, что разработанная турбина имеет оптимальное отношение скоростей $U/C=0,375$ [6].

Снижение утечек потока из центростремительных рабочих лопаток было достигнуто с помощью применения покрывного диска (поз. 5 на рис. 2), прижатого к торцевым поверхностям рабочих лопаток. Диск 1 (рис. 4) имеет окна для прохода воздуха 2 и центрирующую ступицу 3 [7].



Рис. 3. Турбина базовой конструктивной схемы
1 – ПНА; 2 – центробежный сопловой аппарат;
3 – центростремительные рабочие лопатки

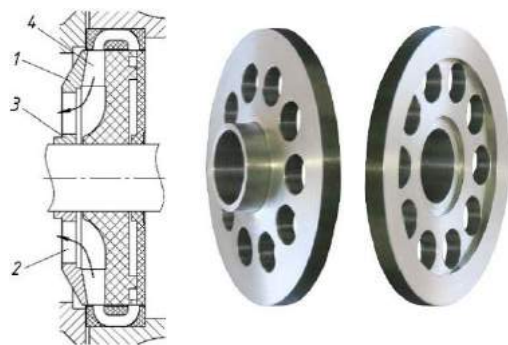


Рис. 4. Покрывной диск рабочих лопаток
1 – покрывной диск; 2 – окна для прохода воздуха;
3 – центрирующая ступица; 4 – рабочие лопатки

Подвод воздуха к турбине через осевую расточку вала уплотнен узлом (поз. 3 на рис. 2), содержащим уплотняющие диски 1 с заостренными гребнями, которые сопряжены с валом [8] (рис. 5). В процессе сборки турбопривода диски поочередно устанавливаются на вал 2 и фиксируются гайкой 3. Перед первым пуском машины производится притирка сопряженных поверхностей (см. фотографию наружной поверхности вала после притирки), по окончании которой вращение вала осуществляется без фрикционного взаимодействия с дисками.

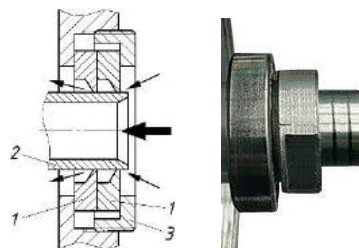


Рис. 5. Уплотнение подвода воздуха к турбине
1 – уплотняющие диски; 2 – вал; 3 – гайка

В процессе работы машины поток воздуха, протекающий через уплотнение, внезапно расширяется в камерах за гребнями дисков 1. Это приводит к потере существенной части кинетической энергии потока и минимизации утечек. Конструкция узла уплотнения позволяет добиться минимально возможного по условиям машиностроительного производства зазора между гребнем и валом, величина которого не превышает нескольких сотых долей миллиметра.

2.2. Турбина повышенного крутящего момента

В процессе создания прямых и угловых шлифовальных машин была поставлена задача разработки турбоприводов повышенного крутящего момента, обеспечивающих эффективную работу на частотах вращения меньших, чем у турбоприводов базовой конструктивной схемы (рис. 2). Задача была решена путем использования турбин с двумя ступенями давления [9], которая была применена в некоторых моделях прямых и угловых машин (рис. 6). В качестве первой ступени давления была применена радиальная двухступенчатая турбина базовой конструктивной схемы 1. В качестве второй ступени в большинстве машин была применена центробежная турбина 2, содержащая неподвижный аппарат и рабочее колесо, на лопатках которого установлен покрывной диск 3. Крепление покрывного диска обеспечивается по поверхностям отверстий, выполненных в диске, с пальцами, установленными на торцевых поверхностях рабочих лопаток [10] (рис. 7).

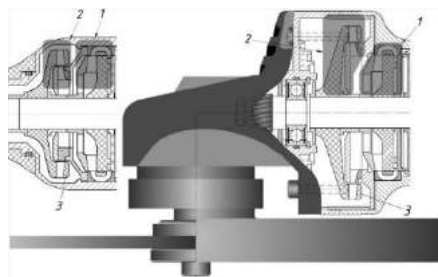


Рис. 6. Турбины с двумя ступенями давления
1 – первая ступень давления; 2 – вторая ступень давления;
3 – покрывной диск РК второй ступени



Рис. 7. Покрывной диск центробежных лопаток
1 – покрывной диск; 2 – пальцы; 3 – рабочие лопатки

В малогабаритных прямых машинах применение двухступенчатой турбины с центробежной второй ступенью давления (рис. 6) оказалось невозможным из-за имеющихся габаритных ограничений. Задача создания компактного турбопривода с двумя ступенями давления 1 и 2 (рис.8) была решена на базе применения в качестве второй ступени инновационной центробежно-центростремительной турбины [11] с межлопаточными каналами 3 РК, сходными по своей конфигурации с межлопаточными каналами описанного выше ПНА турбины первой ступени.

Во время работы турбины воздух ускоряется в соплах 2 центробежного СА 1 (рис. 9). В лопатках 4 РК 3, прикрытых бандажными полками 5 и 6, поток разворачивается с центробежного направления на центростремительное, одновременно меняя направление своей тангенциальной закрутки. По показателям эффективности турбина с инновационной второй ступенью сопоставима с описанной выше турбиной с центробежной второй ступенью.

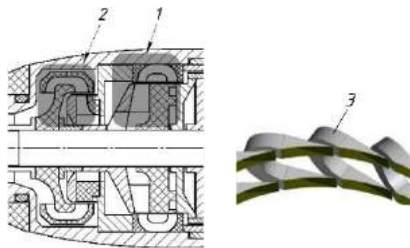


Рис. 8. Машина с инновационной второй ступенью
1 – первая ступень давления; 2 – вторая ступень давления; 3 – межлопаточные каналы РК второй ступени

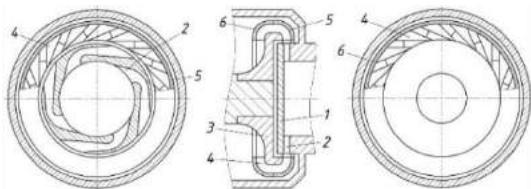


Рис. 9. Инновационная турбина второй ступени
1 – СА; 4 – сопловые лопатки; 2 – РК; 3 – сопла; 4 – рабочие лопатки; 5, 6 – бандажные полки

Проблема утечек воздуха между ступенями давления была решена с помощью уплотнения (рис. 10), в котором ступени разделены диафрагмой 1 с уплотняющим диском 2; заостренный гребень диска сопряжен с валом 3 [8]. В процессе сборки диафрагма устанавливается на вал и фиксируется втулкой 4. Перед запуском машины проводится притирка сопряженных поверхностей, по окончании которой вращения вала осуществляется без фрикционного взаимодействия с диском. В процессе работы машины поток воздуха, протекающий через уплотнение, внезапно расширяется в пространстве за гребнем диска 2. Это приводит к потере существенной части энергии потока и минимизации утечек. Конструкция проста и технологична; его высокая уплотняющая способность, как и в описанном выше узле уплотнения подвода воздуха к валу, обеспечивается малым радиальным зазором между гребнем диска и валом.

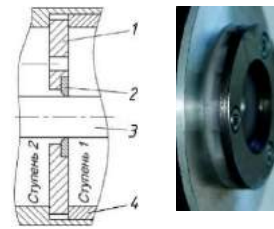


Рис. 10. Уплотнение ступеней давления
1 – диафрагма; 2 – уплотняющий диск;
3 – вал; 4 – втулка

2.3. Дополнительные элементы турбоприводов

Регулятор частоты вращения ротора [12, 13] (поз. 2 на рис. 2) решает две важные задачи: снижение частоты вращения холостого хода турбопривода и стабилизацию частоты вращения ротора при переменной нагрузке на инструмент. Исполнительным элементом регулятора является эластичное кольцо, установленное в канале подвода воздуха к турбине (рис. 11).

При вращении ротора кольцо, взаимодействуя с обоймой, подвергается упругой деформации под действием центробежных сил; величина деформации кольца и, соответственно, площадь сечения прохода воздуха к турбине зависит от частоты вращения ротора. Вследствие деформации кольца происходит дросселирование воздуха, снижающее давление перед турбиной. При остановке ротора эластичное кольцо возвращается в исходное состояние.

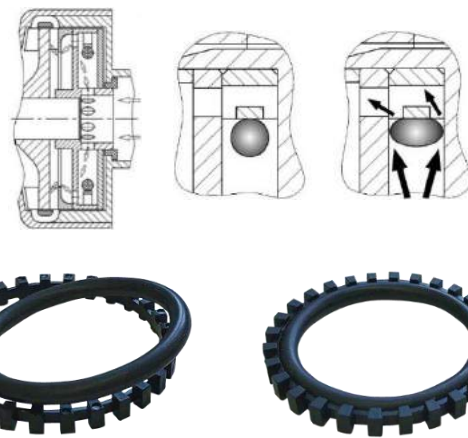


Рис. 11. Регулятор частоты вращения

Устройство автоматического торможения ротора [14] (поз. 4 на рис. 2) является важным фактором эргономичности машин. Торможение производится с помощью фрикционного взаимодействия тормозной колодки 1 и боковой стенки 2 ресивера 3 подвода воздуха к турбине (рис. 12).

В машине, отключенной от системы сжатого воздуха, колодка 1 прижата пружиной 4 к боковой стенке. При включении машины часть воздуха проходит из ресивера через группу отверстий 5, образующих осевой газостатический подпятник, к тормозной колодке. При этом воздух отжимает колодку от боковой стенки, что обеспечивает свободное вращение ротора. При выключении машины тормозная колодка под действием пружины прижимается к боковой стенке, запуская процесса

торможения. При этом штифты 6 фиксируют колодку от смещения в тангенциальном направлении.

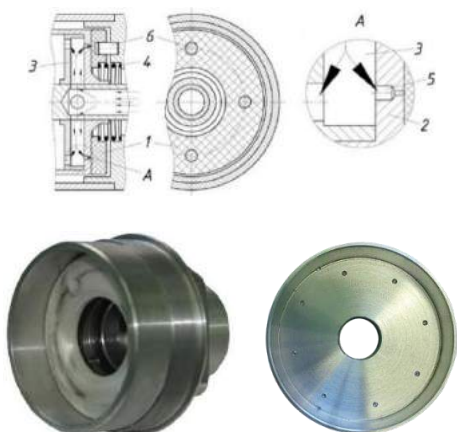


Рис. 12. Устройство торможения ротора
1 – тормозная колодка; 2 – боковая стенка;
3 – ресивер; 4 – пружина; 5 – отверстие; 6 – штифты

3. Преимущества разработанных машин

Синтез описанных конструктивных решений позволил создать турбоприводы, обеспечивающие высокоэффективную работу в широком диапазоне мощностей и частот вращения. Преимущества разработанных турбоприводов шлифовальных машин обусловлены следующими факторами:

- характеристика применяемых турбин обеспечивает высокий КПД и крутящий момент на рабочей частоте вращения;
- течение газа в РК происходит в одной плоскости без существенных утечек воздуха из рабочих лопаток;
- применение покрывных дисков РК позволило дополнительно снизить потери от утечек;
- радиальный тип лопаточных венцов РК и каналов ПНА позволяет изготавливать их из пластмассы путем литья под давлением в прессформах; это обеспечило малый вес и высокую технологичность изготовления деталей турбины;
- РК турбины располагается концентрично внутри кольца ПНА, что обеспечивает компактность конструкции и высокую технологичность процесса сборки;
- применение второй ступени давления позволило снизить величину эффективной частоты вращения турбин на величину порядка 30% и обеспечило возможность применения шлифовальных машин с относительно тихоходными инструментами;
- благодаря применению регулятора была ограничена величина частоты вращения холостого хода и обеспечена стабильность частоты вращения ротора при изменяющейся нагрузке на инструмент; регулятор технологичен, компактен и имеет высокое быстродействие;
- примененные узлы уплотнения обеспечивают минимальные протечки воздуха на входе в вал и между ступенями давления; узлы уплотнения просты и технологичны, их высокая эффективность обеспечивается крайне малыми радиальными зазорами между диском и валом;

- наличие устройства автоматического торможения ротора обеспечило высокую эргономичность машин; устройство технологично и компактно, для его функционирования затрачивается относительно небольшой расход воздуха.

- наличие большого числа пластмассовых деталей и легкого компактного регулятора обуславливают малую величину вращающихся масс и низкий уровень вибрации шлифовальных машин.

4. Экспериментальное исследование машин

Расчеты, предварительно проведенные с учетом данных [15, 16] позволили определить ряд целевых параметров разработанных турбинных приводов. Так, для турбин с диаметром сегнера колеса 56 мм и площадью проходного сечения сопел 20 мм² целевые значения мощности были установлены следующими:

- 800 Вт при частоте вращения 35000 об/мин для турбины базовой конструктивной схемы (рис. 2);
- 900 Вт при частоте вращения 25000 об/мин для турбины повышенного крутящего момента (рис. 6).

Экспериментальные зависимости мощности от частоты вращения турбин приведены на рис. 13. Испытания проводились на специально разработанном стенде [17] в диапазоне частот вращения от 0 до 23000 об/мин; полученные результаты экспериментов были экстраполированы до частоты вращения 60000 об/мин.

Испытания подтвердили соответствие мощности разработанных турбин указанным выше целевым показателям.

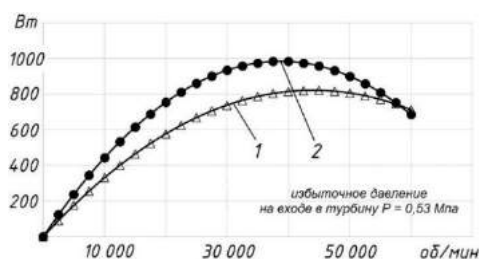


Рис. 13. Экспериментальные зависимости мощности от частоты вращения турбин

- 1 – турбина базовой конструктивной схемы;
- 2 – турбина повышенного крутящего момента

Заключение

Модельная линия разработанных машин

На основе разработанных конструкций турбоприводов был создан класс быстроходных ручных шлифовальных пневматических машин повышенной мощности. Модельная линия машин состоит из двух групп:

- угловые машины с частотой вращения 6500...12000 об/мин и мощностью – 900... 2000 Вт;
- прямые машины с частотой вращения 25000...65000 об/мин и мощностью – 200... 1200 Вт.

На рис. 14 приведена фотография работы машины; на рис. 15 приведены некоторые из шлифовальных машин разработанной модельной линии.



Рис. 14. Работа шлифовальной машины



Рис. 15. Угловые и прямые шлифовальные машины разработанной модельной линии

Литература

1. Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я., Фершалов М.Ю. Эффективность малогабаритных турбинных ступеней с малыми углами выхода сопел // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-1 (39). С. 57-62.
2. Юртаев А.А., Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я., Поршкевич В.В. Оптимизация энергетической эффективности ступеней осевой микротурбины с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3-3 (45). С. 59-63.
3. 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. №4-1 (54). С.47-52.
4. Патент РФ на полезную модель №139138, F01D 1/32. Турбинный привод / Ю.П. Кузнецов – 2013. Бюл. № 10.
5. Кузнецов Ю.П., Химич В.Л., Хрунков С.Н., Крайнов А.А. Радиальная двухступенчатая микротурбина для пневматического привода // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2016. № 2. С. 119-122.
6. Хрунков С.Н. Динамика, моделирование и практическая реализация приводов машин на основе малоразмерных многоступенчатых радиальных турбин. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Нижний Новгород, 2022. – 461 с.
7. Патент РФ на полезную модель №108482, F01D 1/08. Турбинный привод / Ю.П. Кузнецов – 2011. Бюл. № 26.
8. Патент РФ на полезную модель №202076, F01D 11/00. Уплотнение ротора турбопривода / Ю.П. Кузнецов – 2021. Бюл. № 4.
9. 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
10. Патент РФ на полезную модель №118688, F01D 1/08. Радиальный турбинный привод / Ю.П. Кузнецов, А.Б. Чуваков – 2012. Бюл. № 21.
11. Патент РФ на полезную модель №193555, F01D 1/06. Малоразмерная турбина / Ю.П. Кузнецов – 2019. Бюл. № 31.
12. Патент РФ на полезную модель №148088, F01D 1/32. Пневматический двигатель / Ю.П. Кузнецов – 2014. Бюл. № 33.
13. V.L. Khimich, A.B. Chuvakov, S.N. Khrunkov. Maximum rotation frequency regulators of high-speed small-sized pneumatic actuators // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Т. 11. № 18. С. 9256-9260.
14. Патент РФ на полезную модель №169771, B24B 47/14. Пневматический привод вращения для ручной шлифовальной машины / Ю.П. Кузнецов и др. – 2017. Бюл. № 10.
15. Арестов О.В., Цыганкова Л.П., Глушко Е.В., Морозова Н.Т. Эффективность рабочих колес газовых осевых малоразмерных турбин // Морские интеллектуальные технологии. 2023. №2-1 (60). С.99-103.
16. Пассар А.В., Тимошенко Д.В., Фершалов Ю.Я. Оптимальные значения угла выхода потока из соплового аппарата радиально-осевой турбины в зависимости от режима ее работы // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3-1 (57). С. 129-135.
17. Погодин Р.А. Динамика, обоснование и практическая реализация конструктивных решений для малоразмерных турбоприводов шлифовальных пневматических машин. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Нижний Новгород, 2022. – 177 с.

References

1. A. Yu. Fershalov, Yu. Ya. Fershalov, M. Yu. Fershalov. Efficiency of the small-sized turbine stages with small outlet angle of nozzles // Marine intellectual technologies. 2018. № 1-1 (39). P. 57-62.
2. A.A. Yurtaev, A.Yu. Fershalov, Yu.A. Fershalov, V.V. Porshkevich. 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.
3. Yu. P. Kuznetsov, V. L. Khimich, S. N. Khrunkov, A. B. Chuvakov, R. A. Pogodin. Trends and development prospects of manual pneumatic grinding machines // Marine intellectual technologies. 2021. №4-1 (54). P.47-52.
4. Utility model patent RU139138, F01D 1/32. Turbine drive / Yu.P. Kuznetsov – 2013. Bulletin No.10.
5. Kuznetsov Y.P., Khimich V.L., Khrunkov S.N., Krainov A.A. Radial two-stage microturbine for pneumatic actuation // Russian Aeronautics. 2016. Т. 59. № 2. С.283-286.

6. S.N. Khrunkov. Dynamics, modeling and practical implementation of machine drives based on small-sized multistage radial turbines. Thesis for Dr. Sci. (Eng) degree. – Nizhny Novgorod, 2022. – 461 p.
7. Utility model patent RU108482, F01D 1/08. Turbine drive / Yu.P. Kuznetsov – 2011. Bulletin No.26.
8. Utility model patent RU202076, F01D 11/00. Turbine drive rotor seal / Yu.P. Kuznetsov – 2021. Bulletin No.4.
9. Kuznetsov, Y.P., Khimich, V.L., Khrunkov, S.N., Chuvakov, A.B., Pogodin, R.A. Research of the Radial Jet Turbine Characteristics // Russian Aeronautics. 2020. 63(4), с. 721-729
10. Utility model patent RU118688, F01D 1/08. Radial turbine drive / Yu.P. Kuznetsov and others – 2012. Bulletin No.21.
11. Utility model patent RU193555, F01D 1/06. Small-sized turbine / Yu.P. Kuznetsov – 2019. Bulletin No.31.
12. Utility model patent RU148088, F01D 1/32. Pneumatic motor / Yu.P. Kuznetsov – 2014. Bulletin No.33.
13. Khimich V.L., Chuvakov A.B., Khrunkov S.N. Maximum rotation frequency regulators of high-speed small-sized pneumatic actuators // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. T. 11. № 18. С. 9256-9260.
14. Utility model patent RU169771, B24B 47/14. Pneumatic rotation drive for manual grinding machine / Yu.P. Kuznetsov and others – 2017. Bulletin No.10.
15. O. V. Arestov, L. P. Tsigankova, E. V. Glushko, N. T. Morozova. Efficiency of gas axial small turbine impellers // Marine intellectual technologies. 2023. №2-1 (60). P.99-103.
16. Andrey V. Passar, Denis V. Timoshenko, Yuriy Ya. Fershalov. Optimal values of the angle of exit of the flow from the nozzle apparatus radial-axial turbine, depending on the mode of its operation // Marine intellectual technologies. 2022. № 3-1 (57). P. 129-135.
17. R.A. Pogodin. Dynamics, substantiation and practical implementation of design solutions for small-sized turbine drives of grinding pneumatic machines. Thesis for Ph.D. (Eng) degree. – Nizhny Novgorod, 2022. – 177 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

Юрий Павлович Кузнецов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры энергетических установок и тепловых двигателей, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний Новгород, 24, e-mail: inturbo@yandex.ru

Сергей Николаевич Хрунков, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергетических установок и тепловых двигателей, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний Новгород, 24, e-mail: khrunkov@nntu.ru

Александр Борисович Чуваков, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергетических установок и тепловых двигателей, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний Новгород, 24, e-mail: tchouvakov@mail.ru

Роман Александрович Погодин, аспирант кафедры энергетических установок и тепловых двигателей, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний Новгород, 24, e-mail: rpogodin@yandex.ru

Yuriy P. Kuznetsov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Power Plants and Heat Engines, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, ul. Minina 24, 603950, Nizhny Novgorod, Russia, e-mail: inturbo@yandex.ru

Sergey N. Khrunkov, Dr. Sci. (Eng), Assistant Professor, Head of the Department of Power Plants and Heat Engines, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, ul. Minina 24, 603950, Nizhny Novgorod, Russia, e-mail: khrunkov@nntu.ru

Aleksandr B. Chuvakov, Ph.D. (Eng), Assistant Professor, assistant professor of the Department of Power Plants and Heat Engines, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, ul. Minina 24, 603950, Nizhny Novgorod, Russia, e-mail: tchouvakov@mail.ru

Roman A. Pogodin, Ph.D. (Eng), senior engineer of the Department of Power Plants and Heat Engines, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, ul. Minina 24, 603950, Nizhny Novgorod, Russia, e-mail: rpogodin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 03.07.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 11.08.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 15.08.2023.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ) SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Научная статья

УДК 621.431.7

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.005>

Работа судового двигателя внутреннего сгорания по замкнутому циклу с использованием электролизера

Т.Г. Тория¹ p.lepik@yandex.ru, А.И. Епихин¹ bsmbeton@mail.ru, Е.В. Хекерт¹ zur_mga@nsma.ru,
М.А. Модина¹ marishamodina@yandex.ru, Г.Л. Козенкова¹ galleon56@mail.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова

Аннотация. Статья раскрывает потенциал и экологическую важность вторичного использования продуктов сгорания топлива на судах морского и речного флота. Рассмотрен процесс сгорания дизельного топлива и образования химических соединений на примере технических характеристик по типовым расчетам для двигателя «MAN B&W» 7S60MC-C. В результате анализа получены данные о требуемом количестве кислорода для поддержания необходимого содержания кислорода в топливно-воздушной смеси. Определены значения содержания кислорода и водяных паров в атмосферном воздухе, в составе отработанных газов и после скруббера. Произведен расчет цикла сгорания топлива в двигателе в отсутствие питания атмосферным воздухом и на основании полученных данных выведен коэффициент обеднения топливно-воздушной смеси кислородом. В соответствии с полученными данными произведен расчет необходимого количества электролизеров и криогенаторов для обеспечения замкнутого цикла работы двигателя. Проведен расчет потерь мощности двигателя при работе по замкнутому циклу и предложен цикл позиционного насыщения топливно-воздушной смеси кислородом, снижающий экологическое загрязнение отработанными газами.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, морские и речные суда, флот, электролизер бесщелочной, электролизер водяных паров, замкнутый цикл ДВС.

Для цитирования: Тория Т.Г., Епихин А.И., Хекерт Е.В., Модина М.А., Козенкова Г.Л. Работа судового двигателя внутреннего сгорания по замкнутому циклу с использованием электролизера. 2023. № 3 часть 1, С. 43—50. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.005

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.005>

Operation of a marine internal combustion engine in a closed cycle using an electrolyzer

Teodor G. Toria¹ p.lepik@yandex.ru, Aleksey I. Epikhin¹ bsmbeton@mail.ru,
Evgeniy V. Heckert¹ zur_mga@nsma.ru, Marina A. Modina¹ marishamodina@yandex.ru,
Galina L. Kozenkova¹ galleon56@mail.ru

¹Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. The article discusses the potential and environmental significance of recycling fuel combustion products on ships of the sea and river fleet. The process of combustion of diesel fuel and the formation of chemical compounds is considered on the example of technical characteristics according to typical calculations for the MAN B&W 7S60MC-C engine. As a result of the analysis, data are obtained on the amount of oxygen needed to maintain the required oxygen content in the fuel-air mixture. The oxygen and water vapor content values in the atmospheric air, in the exhaust gases, and after the scrubber are determined. The calculation of the fuel combustion process in the engine in the absence of atmospheric air supply is carried out. Based on the data obtained, the fuel-air mixture's depletion coefficient with oxygen is derived. The required number of electrolyzers and cryo-generators is determined following the data obtained to ensure a closed-cycle engine operation. Power losses during engine operation in a closed cycle are estimated. A cycle with positional enrichment of the fuel-air mixture with oxygen is proposed, which reduces environmental pollution by exhaust gases.

Keywords: internal combustion engine, sea and river vessels, fleet, alkaline electrolyzer, water vapor electrolyzer, closed cycle internal combustion engine.

For citation: Teodor G. Toria, Aleksey I. Epikhin, Evgeniy V. Heckert, Marina A. Modina, Galina L. Kozenkova. Operation of a marine internal combustion engine in a closed cycle using an electrolyzer. 2023. № 3 part 1, P. 43—50. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.005

Введение

Одним из самых важных вопросов современности, является повышение экологичности

любых производственных и эксплуатационных процессов, производимых человеком. Такая же задача стоит и перед специалистами, производящими и эксплуатирующими двигатели

внутреннего сгорания на судах морского и речного флота в соответствии с требованиями конвенций и существующих международных соглашений [10, 11].

Одним из возможных способов повышения экологичности работы судовой энергетической установки, имеющей в своем составе дизельный двигатель, может стать использование системы по расщеплению водяных паров в составе отработанных газов на кислород и водород и дальнейшее использование их для обогащения топливно-воздушной смеси и питания водородных аккумуляторов для снижения потерь затрачиваемой мощности двигателя на работу системы [8].

Материалы и методы (Materials and methods)

В ходе произведенных исследований [1] по очистке отработанных газов двигателя внутреннего сгорания, выделению из них водорода при помощи электролизной установки и последующим использованием водорода для питания водородных аккумуляторных батарей, была рассмотрена возможность перенаправления части получаемого в ходе расщепления воды кислорода обратно в во впускной коллектор двигателя для улучшения сгорания топлива [9]. Расчетные данные представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Расчетные данные

	«MAN B&W» 7S60MC-C
Количество двигателей	1
Удельный расход топлива g, г/кВт*ч	172
Мощность двигателя P, кВт	16612,646
Теоретическое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, кмоль/кг, L ₀	0,502
Теоретическое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, кг/кг, L ₀	14,515
Теоретическое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, м ³ /кг, L ₀	11,84
Расход воздуха дизелем G _B , м ³ /ч	19,73
Количество отработавших газов G _T , м ³ /с	28,71 м ³ /с
Коэффициент наполнения	0,877
Необходимое количество кислорода для горения, м ³	2,486
Цикловая подача топлива, кг/цикл	0,065
Рабочий объем цилиндра /всех цилиндров, м ³	0,678 / 4,746
Часовой расход топлива, кг/ч	2857,38
Коэффициент продувки	1,05
Коэффициент избытка воздуха	2,0
Суммарный коэффициент избытка воздуха	2,1
	Водяные пары (H ₂ O)
Содержание в ОГ, %	5,1
Содержание в ОГ, м ³	1,46

Таблица 2

Расчет количества сжиженного водорода для питания электроэнергией судовых потребителей

Судовые потребители электроэнергии, кВт*ч	900
Эффективность водородного элемента (КПД), %	60
Аналог 1 кВт*ч электрической энергии - химической, кВт*ч	1,666
Коэффициент перевода кВт*ч в Джоули, МДж	3,6
Молекулярная масса водорода	2
Энергия 1 кг водорода, МДж	141,8
Необходимое количество водорода, г.	42,3
Количество водорода в 22,4 литрах при н.у., г	2
Необходимое количество водорода при н.у. для выработки 1 кВт*ч, м ³	0,47375
Плотность водорода (газ), кг/м ³	0,0899
Плотность сжиженного водорода (-253 °C), кг/м ³	7,08
Количество водорода, необходимое, для получения 1 литра сжиженного, м ³	0,787541713
Количество сжиженного водорода, необходимого на выработку 1 кВт*ч, м ³	0,000602
Необходимое количество сжиженного водорода для питания судовых потребителей (900 кВт) в течение 1 часа, м ³	0,5418
Необходимое количество сжиженного водорода для питания судовых потребителей (900 кВт) в течение суток, м ³	~13

Исходя из часового расхода топлива 2857,38 кг/ч, 1 кг топлива будет впрыскиваться в цилиндр каждые 1,26 секунд, что обозначает необходимость снабжения двигателя воздухом в размере 24,864 м³ или же 19,73 м³/с.

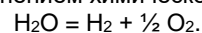
Исходя из содержания кислорода 21%, 4,14 м³/с, чтобы теоретически представить процесс работы двигателя по замкнутому циклу.

Исходя из принятого содержания водяных паров в отработанных газах, имеющих плотность приблизительно равную 0,87 кг/м³, получаем 28,71 м³, из которых 5,1% приходится на водяные пары, что равно 1,46 м³.

Принимая во внимание плотность воды при 100 °C (958 кг/м³) и плотность водяного пара с учетом температуры выхлопных газов (при 250 °C будет равна 19,98 кг/м³), предполагается возможным для получения более точных результатов представить, что водяные пары конденсируются перед расщеплением электролизером и тогда по отношению конденсированная вода будет занимать объем в 47 раз меньше, чем пар. Таким образом, объем конденсированной воды будет равен 0,03 м³.

Однако, стоит отметить, что развитие технологии электролиза воды позволяет производить эту операцию и с водяными парами, а не только с конденсированной водой в щелочной или бесщелочной среде.

Реакция разложения воды описывается следующим уравнением химической реакции:



При разложении одного моля воды образуется половина моля кислорода. Количество вещества, содержащееся в 1 кг воды:

$$M \text{ H}_2\text{O} = 2 + 16 = 18 \text{ г/моль};$$

$$N \text{ H}_2\text{O} = 1000 / 18 = 55,5 \text{ моль}.$$

При разложении 55,5 моль воды выделится 55,5 / 2 = 27,75 молей кислорода.

Один моль идеального газа при нормальных условиях занимает фиксированный объем равный 22,4 литра.

Необходимый объем кислорода составит:

$$V \text{ O}_2 = 27,75 \times 22,4 = 621,6 \text{ л}$$

Из одного литра воды можно получить 0,6216 м³ кислорода. Количество кислорода, возможное к получению из водяных паров в отработанных газах будет равно 18,648 м³.

Так же представляется необходимым рассмотреть процесс парообразования, происходящий при прохождении отработанных газов через скруббер, где они так же насыщаются водяными парами, что могут быть конденсированы, проведены через электролизер и перенаправлены во впускной коллектор. Предполагая, что из-за процессов кипения и испарения, вызванных высокой температурой газов, а также допуская, что скруббер производит очистку путем барботажа, допускаем, что влажность отработанных газов будет равна 64,3%. Исходя из выдвинутого допущения, объем водяных паров после очистки составит по пропорции 16,06 м³, который при конденсации примет объем в 1602 раза меньший, чем пар, что будет равно 0,01 м³, что при

разложении электролизером даст 6,216 м³. Суммарно могут быть получены 0,04 м³ воды, что при разложении путем электролиза дадут 24,864 м³ кислорода при полном разложении, что позволяет говорить о возможности получения достаточного количества кислорода из водяных паров в ходе электролиза.

Так же необходимо принять во внимание, что отработанные газы имеют часть кислорода уже после процесса сгорания топлива в размере от 2% до 18%, что позволяет говорить о том, что отработанные газы еще до очистки содержат от 1,87 м³ до 16,91 м³ кислорода [7]. В данном расчете принято значение 13% содержания кислорода в ОГ, что приводит к критическому падению содержания кислорода в составе топливно-воздушной смеси двигателя при его отключении его питания воздухом из атмосферы уже через 1 цикл сгорания. Исходя из чего, можно сделать вывод о необходимости снабжения кислородом в размере 1,572 м³/с или же 5662,8 м³/ч. Для построения графика был выведен коэффициент обеднения смеси кислородом, принятый отношением содержания кислорода в атмосферном воздухе, поступающем в цилиндры двигателя, к значению содержания кислорода в ОГ, после цикла сгорания топлива. Принято критическое значение в 10% содержания кислорода в ОГ, что отображает невозможность горения топливно-воздушной смеси. Значения, не достигшие критических, помечены красным. Результаты представлены в таблице 3 и на рисунках 1 и 2.

Таблица 3

Концентрация O₂ в ОГ при их рециркуляции без подвода свежего заряда воздуха

Начальное содержание кислорода	1-ый цикл	2-ой цикл	3-й цикл	4-й цикл	5-й цикл
18%	3,548571	3,041633	2,607114	2,234669	1,91543
17%	3,351429	2,713061	2,196288	1,777947	1,439291
16%	3,154286	2,403265	1,831059	1,395093	1,062928
15%	2,957143	2,112245	1,508746	1,077676	0,769769
14%	2,76	1,84	1,226667	0,817778	0,545185
13%	2,562857	1,586531	0,982138	0,60799	0,376375
12%	2,365714	1,351837	0,772478	0,441416	0,252238
11%	2,168571	1,135918	0,595005	0,311669	0,163255
10%	1,971429	0,938776	0,447036	0,212874	0,101369
9%	1,774286	0,760408	0,325889	0,139667	0,059857
8%	1,577143	0,600816	0,228882	0,087193	0,033216
7%	1,38	0,46	0,153333	0,051111	0,017037
6%	1,182857	0,337959	0,09656	0,027589	0,007882
5%	0,985714	0,234694	0,055879	0,013305	0,003168
4%	0,788571	0,150204	0,02861	0,00545	0,001038
3%	0,591429	0,08449	0,01207	0,001724	0,000246
2%	0,394286	0,037551	0,003576	0,000341	
1%	0,197143	0,009388	0,000447		

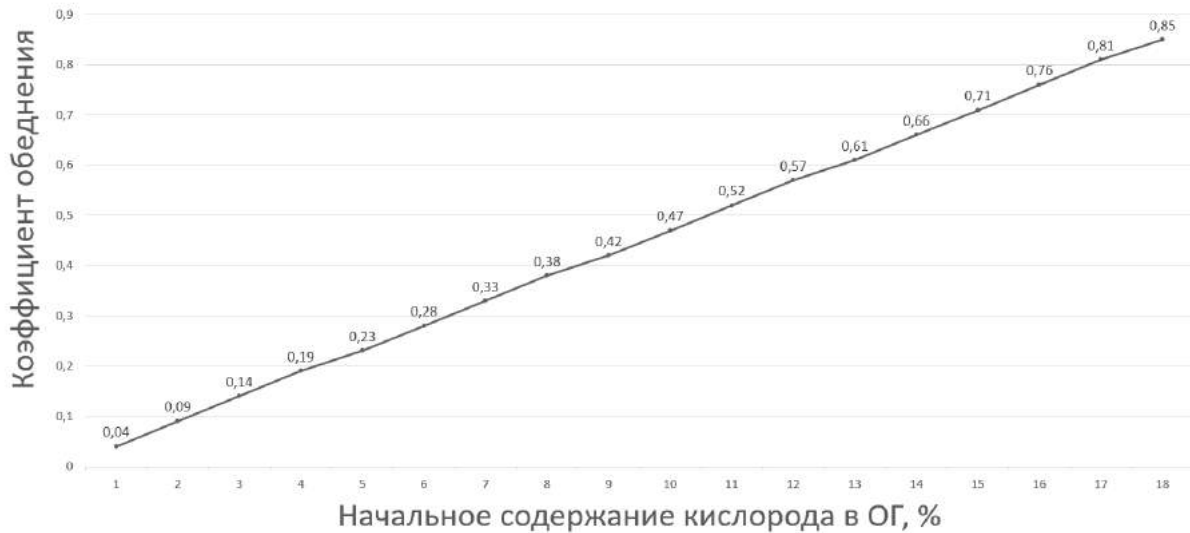


Рис. 1. Зависимость коэффициента обеднения от начального содержания кислорода в ОГ

В данном исследовании рассматривается неизменный режим работы двигателя, также принят линейных характер пропорционального снижения

концентрации кислорода в ОГ после каждого цикла (данное положение условно и требует дальнейшего изучения)

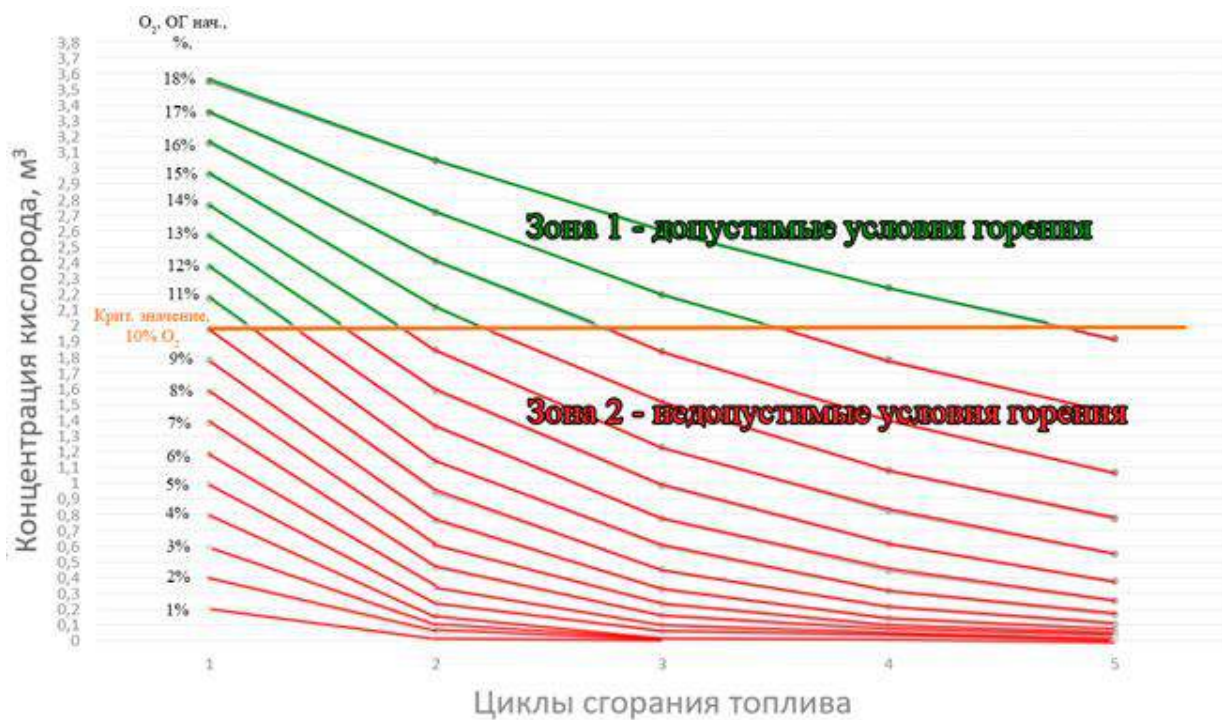


Рис. 2. Концентрация O₂ в ОГ при их рециркуляции без подвода свежего заряда воздуха

При работе одного электролизера (при содержании кислорода 13% в ОГ) возможно производство одного полного цикла без выбросов

отработанных газов в атмосферу каждые 24 секунды, что представлено на рисунках 3, 4 и таблице 4.

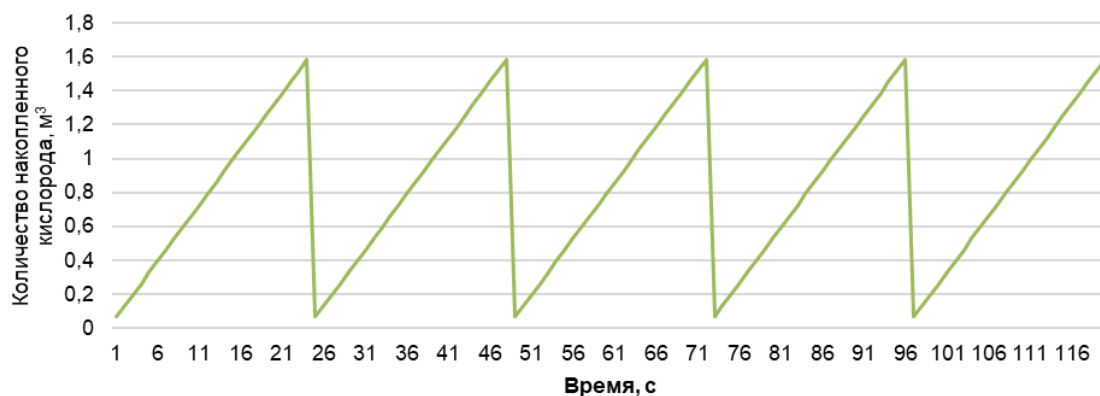


Рис. 3. Позиционный режим работы одного электролизера при генерации O₂

Таблица 4

Процесс накопления кислорода при позиционном режиме работы одного электролизера

V O ₂ , 1-12 с., м ³	0,066	0,132	0,198	0,264	0,33	0,396	0,462	0,528	0,594	0,66	0,726	0,792
V O ₂ , 13-24 с., м ³	0,858	0,924	0,99	1,056	1,122	1,188	1,254	1,32	1,386	1,452	1,518	1,584

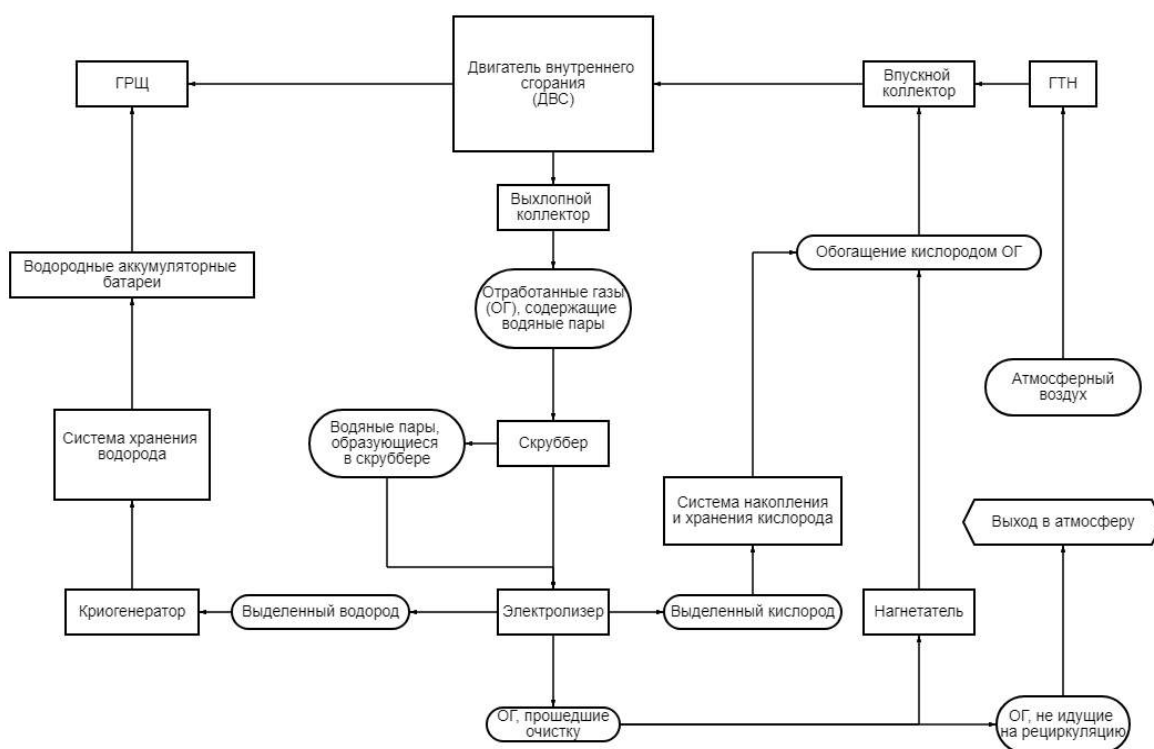


Рис. 4. Работа ДВС с позиционной подачей кислорода для рециркуляции

Работа одного электролизера по подобному циклу способна снизить выбросы на 103356 м³, что дает повышение экологичности работы установки на 4,16%. Увеличение количества электролизеров до 12 экземпляров способно сократить время накопления до 2-х секунд, соответственно повышая экологичность работы судовой энергетической установки на 50%.

Результаты (Results)

Однако, принимая во внимание ограничения по производительности электролизеров, принимается в качестве прототипа для расчета установка, имеющая производительность 30 нм³/ч водорода, что по пропорции разложения воды соответствует 240 м³/ч.

Потребляемая мощность одним электролизером:
 $5,8 \text{ кВт} * \text{ч} / \text{нм}^3 * 30 \text{ нм}^3 / \text{ч} = 174 \text{ кВт}$ (1)

Требуется электролизеров:
 $5662,8 \text{ м}^3 / \text{ч} \div 240 \text{ м}^3 / \text{ч} \approx 24$ (2)
 Потребляемая электролизерами мощность:
 $24 \times 174 \text{ кВт} = 4176 \text{ кВт}$ (3)

Потребляемая электролизерами мощность составляет 25,13 % от общей мощности энергетической установки.

В целях уменьшения данного процента потери энергии, уходящей на работу установки, предлагается возможным использование системы сжижения водорода и питания им водородных аккумуляторных батарей.

Следуя данным таблицы 2, необходимое количество водорода при н.у. для выработки 1 кВт*ч, равно 0,47375 м³.

Электролизеры в количестве 24 экземпляров вырабатывают 720 м³/ч, что обозначает возможность производства энергии в размере 1519,79 кВт*ч.

Необходимо вычесть из полученной энергии, энергию затраченную на производство сжиженного водорода.

Установка, производящая сжиженный водород (гелиевый криогенатор), имеет производительность 1 м³/ч и потребляет 15 кВт*ч/кг на получение сжиженного водорода.

Согласно с пропорцией о том, что для получения 0,001 м³ сжиженного водорода необходимо использовать 0,7875 м³ водорода при н.у., получаем, что из 720 м³ водорода, полученного в электролизерах, возможно получить 0,914 м³ сжиженного, масса которого будет равна 6,47 кг.

Исходя из производительности криогенатора, получаем потребление равное 97,05 кВт*ч.

Итого получено энергии 1422,74 кВт*ч, что составляет 34,07% снижения потерь, а итоговое значение потерь снижается с 25,13% до 16,57%.

Принципиальная схема работы ДВС по замкнутому циклу представлена на рисунке 5.

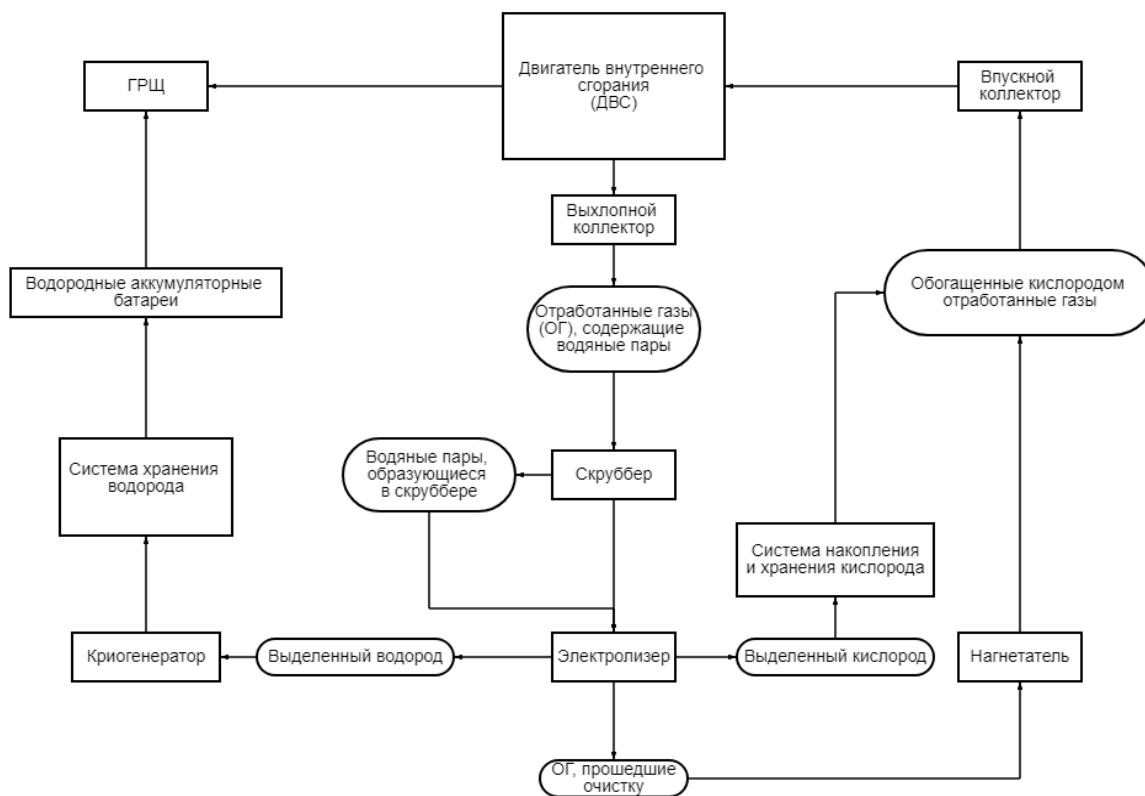


Рис. 5. Схема замкнутого цикла ДВС

Выводы (Conclusions)

Таким образом, использование подобной схемы обогащения отработанных газов, отправленных на рециркуляцию добавочным кислородом позволяет говорить о возможности вторичного использования газов и получения замкнутого цикла работы ДВС, что позволит снизить экологическое загрязнение с судов.

Касаемо второй составляющей данной комплексной системы – использования выделенного водорода для получения добавочной энергии. Несмотря на доказанные свойства дистиллированной воды, (не проводит электрического тока), в настоящее время есть

электролизерная установка, способная расщеплять воду вне специальных добавок и щелочей [5], что позволяет говорить о возможности расщепления на кислород, необходимый для обогащения топливовоздушной смеси, и водород, используемый в водородных аккумуляторных батареях, водяных паров и конденсированной воды, полученной после охлаждения паров, образованных скруббером, так же возможно применение электролизера способного расщеплять водяные пары [6].

Кроме того применение данной системы способствует повышению КПД двигателя за счет дожигания несгоревшего топлива в ходе цикла

работы ДВС. Это соответственно позволит уменьшить цикловую подачу топлива.

Применение подобного решения положительно скажется на экологических показателях двигателей

внутреннего сгорания и станет важным шагом в достижении цели снижения выбросов судами речного и морского флота.

Литература

1. Т. Г. Тория, А. И. Епихин, С. И. Кондратьев, М. А. Модина Комплексное решение, включающее в себя систему по выделению, сжижению и использованию водорода на судах морского флота для повышения экологичности судовой энергетической установки. Эксплуатация морского транспорта. 2022. № 4 (105). С. 121-125.
2. А. Г. Касаткин Основные процессы и аппараты химической технологии, Государственное научно-техническое издательство химической литературы, Москва, 1961 г. стр. 587-589.
3. Н. А. Земцов, А. И. Чигодайкин, Т. Г. Тория, А. И. Епихин Работа судовой энергетической установки по замкнутому циклу. Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, № 3(40), 2022. С. 26-29.
4. M. V. Vasilescu, O. N. Volintiru, A. I. Epikhin, T. G. Toria Closed-loop marine engine operation with zero emissions of harmful combustion products. Operation of marine transport No. 4(105) 2022. P. 203-207.
5. Данные и исследования ООО «Поликом» - промышленные генераторы водорода.
6. Калиновский Е.А., Шустов В.А., Е.М.Шембель, Россинский Ю.К. Описание изобретения к авторскому свидетельству «Электролизер для получения кислорода из водяных паров воздуха», Днепропетровский химико-технологический институт им. Ф.Э. Дзержинского, 1982.
7. Ахромешин А. В. Применение системы рециркуляции отработавших газов в ДВС с управляемым газообменом. Известия ТулГУ. Технические науки. 2010.
8. А.И. Епихин, М.А. Модина, Е.В. Хекерт Концепция экологического совершенствования судовых энергетических установок. Эксплуатация морского транспорта. 2020. № 3 (96). С. 127-132.
9. В.П. Максаковский Мировое морское судоходство. Глава №123 Мировая транспортная система. Москва, Дрофа, 2008 г, 4-е изд.
10. МАРПОЛ, Приложение VI (пересмотренное) к Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 года, измененной Протоколом 1978 года к ней (МАРПОЛ 73/78) Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов.
11. Телидис, К. К. Перспективные пути снижения вредных выбросов судовых дизелей с выпускными газами в атмосферу. Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2015. № 2. С. 160-165.

References

1. T. G. Toria, A. I. Epikhin, S. I. Kondratiev, M. A. Modina A comprehensive solution that includes a system for the extraction, liquefaction and use of hydrogen on ships of the navy to improve the environmental friendliness of the ship's power plant. Operation of marine transport. 2022. No. 4(105). pp. 121-125.
2. G. Kasatkin Basic processes and devices of chemical Technology, State Scientific and Technical Publishing House of Chemical Literature, Moscow, 1961, pp. 587-589.
3. N. A. Zemtsov, A. I. Chigodaykin, T. G. Toriya, A. I. Epikhin The work of a ship's power plant in a closed cycle. Bulletin of the Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, No. 3(40), 2022. pp. 26-29.
4. M. V. Vasilescu, O. N. Volintiru, A. I. Epikhin, T. G. Toria Closed-loop marine engine operation with zero emissions of harmful combustion products. Operation of marine transport No. 4(105) 2022. pp. 203-207.
5. Data and research of LLC "Polycom" - industrial hydrogen generators.
6. Kalinovsky E.A., Shustov V.A., E.M.Shembel, Rossinsky Yu.K. Description of the invention to the copyrightcertificate "Electrolyzer for obtaining oxygen from water vapor", Dnepropetrovsk Chemical Technology Institute named after F.E. Dzerzhinsky, 1982.
7. Akhromeshin AV Application of exhaust gas recirculation system in internal combustion engines with controlled gas exchange. News of TulGU. Technical science. 2010.
8. A.I. Epikhin, M.A. Modinae, E.V. Heckert Concept of environmental improvement of ship power plants. Operation of marine transport. 2020. No. 3(96). pp. 127-132.
9. V.P. Maksakovskiy World maritime shipping. Chapter 123 World transport system. Moscow, Bustard, 2008, 4th ed.
10. MARPOL, Annex VI (revised) to the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (MARPOL 73/78) Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships.
11. Telidis, K. K. Promising ways to reduce harmful emissions from marine diesel engines with exhaust gases into the atmosphere. Scientific problems of transport in Siberia and the Far East, 2015. No. 2. pp. 160-165.

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

Теодор Георгиевич Тория, старший преподаватель кафедры эксплуатации судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Новороссийск, пр-т. Ленина, 93, e-mail: p.lepik@yandex.ru

Алексей Иванович Епихин кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Эксплуатация судовых механических установок», Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: bsmbeton@mail.ru

Евгений Владимирович Хекерт, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Судовождение», Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924 г. Новороссийск, пр.Ленина,93, e-mail: zur_mga@nsma.ru

Марина Александровна Модина, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушаков, 353924, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: marishamodina@yandex.ru

Галина Леонидовна Козенкова, доцент кафедры Подъемно-транспортные машины и комплексы, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924 г. Новороссийск, пр.Ленина,93, galleon56@mail.ru

Theodor G. Toria, Senior Lecturer of the Department of Operation of Ship Mechanical Installations, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 353924, Novorossiysk, ave. Lenin, 93, e-mail: p.lepik@yandex.ru

Alexey I. Epikhin Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department "Operation of Ship Mechanical Installations", Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk, 353924, e-mail: bsmbeton@mail.ru

Evgeniy V. Kheckert, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Navigation, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk, 353924, e-mail: zur_mga@nsma.ru

Marina A. Modina, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operation of Ship Mechanical Installations, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk, 353924, e-mail: marishamodina@yandex.ru

Galina L. Kozenkova, Associate Professor of the Department of Lifting and Transport Machines and Complexes, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk, 353924, galleon56@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 06.04.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.07.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 01.08.2023

Научная статья

УДК 621.438

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.006>

Расчетные характеристики радиально-осевых турбин

А.В. Пассар¹ passar_av@mail.ru, Ю.Я. Фершалов² : FershalovJuriy@mail.ru¹Вычислительный центр ДВО РАН, ²Дальневосточный федеральный университет

Аннотация. Работа актуальна в свете создания высокоэффективных газовых радиально-осевых турбин для судовых двигателей, приводных двигателей для турбонаддува, ручного пневмоинструмента и других механизмов. Кроме того, такие турбины могут использоваться как самостоятельные двигатели для генерации электроэнергии как в стационарных электростанциях, так и в турбогенераторах для децентрализованного и аварийного электроснабжения. В статье авторы предлагают расширить математическую модель для определения характеристик турбин, рассчитанных для среднего радиуса, используя одномерное квазистационарное приближение и полупирические функции. Эти функции позволяют учесть потерю кинетической энергии в процессе течения газа. Таким образом, можно расчетным путем определять газодинамические характеристики турбин. В работе также представлена методика расчета потерь энергии в межлопаточных каналах турбин на основе аналитического обзора. Для проверки адекватности вычисленных характеристик, последние были сравнены с экспериментальными результатами динамических испытаний турбин, работающих в составе турбокомпрессоров: высокий наддув ТКР-14В-30, средний наддув ТКР-14С-28, ТКР-14С-27, ТКР-14С-26, низкий наддув ТКР-14Н-8А2, ТКР-14Н-9А21. В результате работы представлена модель расчета турбины, которая учитывает потери энергии на среднем радиусе с помощью эмпирических зависимостей. Представленная статья представляет собой разработку адекватной модели для расчета газовых турбин, основанную на среднем радиусе и учитывающую потери энергии с использованием эмпирических зависимостей.

Ключевые слова: Колесо рабочее, коэффициент потерь, турбина радиально-осевая, коэффициент напора, проточная часть, характеристики турбины, линия тока, одномерное квазистационарное приближение

Для цитирования: Пассар А.В., Фершалов Ю.Я. Расчетные характеристики радиально-осевых турбин // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 51—58. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.006

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.006>

Calculation characteristics of radial-axis turbines

Andrey V. Passar¹ passar_av@mail.ru, Yuri Ya. Fershalov² FershalovJuriy@mail.ru¹Computer Center of Far East Branch of the of the Russian Academy of Science, ²Far Eastern Federal University

Abstract: The work is relevant in the light of the creation of highly efficient gas radial-axial turbines for marine engines, drive engines for turbocharging, manual pneumatic tools and other mechanisms. In addition, such turbines can be used as independent engines for generating electricity both in stationary power plants and in turbo generators for decentralized and emergency power supply. In the article, the authors propose to expand the mathematical model for determining the characteristics of turbines calculated for the average radius using a one-dimensional quasi-stationary approximation and semi-empirical functions. These functions allow us to take into account the loss of kinetic energy during the gas flow. Thus, it is possible to calculate the gas dynamic characteristics of turbines. The paper also presents a method for calculating energy losses in the inter-blade channels of turbines based on an analytical review. To verify the adequacy of the calculated characteristics, the latter were compared with experimental results of dynamic tests of turbines operating as part of turbochargers: high boost TKR-14V-30, medium boost TKR-14C-28, TKR-14C-27, TKR-14C-26, low boost TKR-14N-8A2, TKR-14N-9A21. As a result of the work, a turbine calculation model is presented, which takes into account energy losses at an average radius using empirical dependencies. The presented article is the development of an adequate model for calculating gas turbines based on the average radius and taking into account energy losses using empirical dependencies.

Keywords: Operating wheel, loss factor, radial-axial turbine, head factor, flow part, turbine characteristics, current line, one-dimensional quasi-stationary approximation.

For citation: Andrey V. Passar, Yuri Ya. Fershalov Calculation characteristics of radial-axis turbines. Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 1, P. 51—58. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.006

Введение

В настоящее время в секторе судовой энергетики активно ведутся работы по разработке двигателей с высоким отношением мощности к весу. Такие двигатели должны быть компактными, иметь приемлемый вес и обладать высокой эффективностью. В связи с этим турбонаддув стал широко применяться в судовых

двигателях. Кроме того, в настоящее время турбины используются в самолетах, портативных генераторах, а также в пневматическом оборудовании [1]. Обеспечение энергетической безопасности считается одной из главных миссий государства [2]. Создание автономных и неавтономных мощных электростанций на основе высокоэффективных турбин различных конструкций и принципов работы способствует достижению этой цели.

Маленькие турбины обладают высоким КПД при очень высоких значениях частоты вращения. В настоящее время разработаны подшипники, которые позволяют работать турбине при оптимальных частотах вращения. Кроме того, проводятся исследования в области газовых подшипников [3], которые обеспечат работу турбины в необходимом диапазоне частот вращения ротора. Все это делает исследования в данном направлении актуальными, что подтверждается большим количеством опубликованных работ [4-7].

Исследование [8] показывает, что проточная часть турбины оказывает существенное влияние на ее КПД, что сказывается на расходе топлива у двигателей с наддувом. Применение наддувочного механизма, включая турбокомпрессор, в поршневых двигателях выявило ряд проблем, связанных с неправильной конфигурацией межлопаточных каналов, не учитывающей загрязнения газа перед турбиной, который требует очистки [9] и изменяет его свойства [10]. Кроме того, такие турбины работают в нестационарных условиях [11]. До сих пор остается открытым вопрос о том, каким образом при проектировании новых турбин определять их газодинамические характеристики расчетным путем.

Анализ существующих теоретических работ, посвященных методикам оценки характеристик потока [12, 13], позволяет сделать следующий вывод: текущие методики вычисления характеристик ступени на среднем радиусе не обеспечивают достаточно полного описания физических процессов, происходящих при движении газа в межлопаточных каналах турбин. Это связано с введенными в алгоритм расчета предположениями, которые не позволяют связать газодинамические характеристики потока с конструктивными параметрами турбины. В результате проектировщики вынуждены прибегать к методам, основанным на собственной интуиции. Поэтому результаты, полученные на основе проведенных исследований или использование экспериментов для подтверждения теоретических результатов, являются особенно актуальными [14; 15].

Алгоритм численного проектирования ступени для среднего радиуса меридионального сечения базируется на применении уравнений сохранения энергии, расхода и момента количества движения. При определении действительных теплоперепадов в сопловом аппарате (СА) – H_{ca} и в рабочем колесе (РК) – $H_{рк}$ в расчет вводятся коэффициенты потерь в СА – ζ_{ca} и в РК – $\zeta_{рк}$, которыми задаются.

$$H_{ca} = H_{ca}^{ад} (1 - \zeta_{ca}),$$

$$H_{рк} = H_{рк}^{ад} (1 - \zeta_{рк}),$$

где: $H^{ад}$ – располагаемый адиабатный теплоперепад. Однако коэффициенты, для учета потерь в СА и РК могут быть определены по полуэмпирической методике. На сегодняшний день есть ряд зависимостей, с помощью которых можно определить величину доли кинетической энергии, потерянной потоком, в процессе течения (потери или ПКЭ) в лопаточном аппарате турбины. Поэтому успех расчетного алгоритма, позволяющего получать численные значения характеристик ступени на среднем радиусе (СР), зависит от правильного выбора этих полуэмпирических зависимостей. Такой подход требует проверки результатов расчета на СР их адекватности в сравнении с экспериментом. И только после этой проверки, методы можно рекомендовать для практического использования.

Цель работы заключается в демонстрации правомерности использования полуэмпирических методов в методике проектирования турбин для определения потерь на среднем радиусе. Кроме того, показать, как эти методы могут быть применены для вычисления газодинамических параметров турбины.

Полуэмпирические зависимости для расчета значений потерь

ПКЭ в пограничном слое. Как приведено в работе [16], основой для расчета потерь энергии являются потери трения в граничном слое на поверхностях лопаток (рис. 1). Это связано с возможностью определять остальные типы потерь в виде функции от потерь трения.

На данный момент существует значительный опыт в определении значений потерь трения на профиле. Тем не менее, наиболее распространенной и наилучшим образом соответствующей эмпирически полученным данным является функция, базирующаяся на интегрировании уравнения импульса в пограничном слое несжимаемой жидкости [17]:

$$\zeta_{тр} = 2 \frac{\delta_{2сп}^{**} + \delta_{2вог}^{**}}{t \sin \beta_2}, \quad (1)$$

где δ_2^{**} – ширина утраты в выходном сечении решетки импульса потока на выпуклой (сп) и вогнутой (вог) сторонах профиля, соответственно.

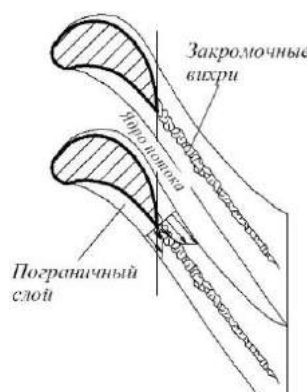


Рис. 1. Схема расчета потерь трения и кромочных потерь

Потеря импульса для выходного сечения решетки определяется следующим выражением:

$$\delta_2^{**} = 0,0361 Re^{-0,2} \left(\int_0^{\bar{s}} \bar{w}^{3,86} d\bar{s} \right)^{0,8}, \quad (2)$$

где \bar{w} – значения скорости, отнесенной к скорости w_2 ; \bar{s} – длина скелетной линии профиля, отнесенная к хорде профиля.

Таким образом, формула (1) принимает следующий вид:

$$\zeta_{тр} = \frac{0,072}{Re^{0,2} \sin \beta_2} \left(\frac{S_{сп}}{t_{cp}} \right)^{0,8} \left[\left(\frac{\bar{w}_{сп}}{w_2} \right)^{3,09} + \left(\frac{\bar{w}_{вог}}{w_2} \right)^{3,09} \right], \quad (3)$$

где: $S_{сп}$ – длина скелетной линии лопатки; t_{cp} – шаг лопаток средний, $t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2}$; $\bar{w}_{сп}$ и $\bar{w}_{вог}$ – значения скоростей на поверхностях профилей средние.

Вычисление средних скоростей потока на поверхностях профилей [18, 19] базируется на интегрировании уравнений двумерного неплоского движения идеального газа в каналах СА и вращающегося РК: отсутствие циркуляции абсолютной скорости при обтекании профиля, сохранение массы и момента количества движения, а также энергии и состояния. Следует помнить, что формула (2) основывается на свойствах идеальной

жидкости. В то же время есть теоретические результаты, адекватные экспериментам [17], которые доказывают, что учет явления «сжимаемость» при вычислении характеристик пограничного слоя при $M < 1,5$ приводит к уменьшению δ^{**} менее 5 %.

Необходимо отметить ограничение формулы (2) – она не учитывает Кориолисовы и инерционные центробежные силы, которые оказывают влияние на характеристики пограничного слоя на поверхности лопаток РК. Автор работы [19] показал, что результаты численного и физического экспериментов подтвердили, что учет вышеупомянутых сил вызывает малозначительное уточнение значения δ^{**} . Таким образом, это позволяет использовать выражение (3) для уточнения потерь трения при вращающемся РК.

Кромочные потери физически связаны с таким явлением, как отрыв пограничного слоя при сходе с выходных кромок лопаток. В результате взаимодействия пограничных слоев, исходящих с выпуклой и вогнутой поверхностей профиля, с ядром потока (см. рисунок 1), возникает кромочный след. За выходной кромкой образуются вихри, которые расходятся, и на некотором расстоянии за решеткой скорости практически выравниваются. В процессе образования и поддержания вихревого движения за лопаткой теряется кинетическая энергия газа. Кроме того, на границе кромочного следа и ядра потока возникает интенсивный турбулентный обмен. Теоретическое определение величины кромочных потерь представляет собой сложную задачу, которая до сих пор остается нерешенной из-за сложности физики явлений в турбулентных течениях и ограничений при моделировании отрыва потока. Подробные исследования структуры вихревого следа за выходными кромками [17] показывают, что процесс образования вихрей зависит от толщины выходной кромки. Результаты исследований обтекания пластин также показали, что коэффициент кромочных потерь $\zeta_{кр}$ пропорционален толщине кромки $\Delta_{кр}$ и давлению за ней.

Используя различные варианты выходных кромок лопаток, экспериментальные исследования показали, что для снижения профильных потерь необходимо делать выходную кромку как можно более тонкой. Кроме того, оптимальное соотношение относительного шага лопаток (t/b) СА составляет от 0,6 до 0,8. В работе [20] автор предположил, что коэффициент кромочных потерь зависит от толщины кромки $\Delta_{кр}$ и размера узкого сечения $a_{кр}$. Он разработал эмпирическую формулу, основанную на этом предположении, которая успешно соответствует экспериментальным результатам и позволяет оценить величину кромочных потерь.

$$\zeta_{кр} = k \frac{\Delta_{кр}}{t \sin \alpha}; \quad (4)$$

где: k – значения эмпирического коэффициента, основанные на данных из работ [17,19], составляют от 0,18 до 0,2; $\Delta_{кр}$ – толщина выходной кромки; t – шаг лопаток; α – угол выхода потока из решетки.

Уравнение (4), которое описывает кромочные потери на расчетном режиме, не учитывает случай нулевой толщины кромки, где $\zeta_{кр} \neq 0$. Окончательный вид зависимости для профильных потерь на расчетном режиме примет вид:

$$\zeta_{пр} = \zeta_{тр} + k \frac{\Delta_{кр}}{t \sin \alpha}.$$

ПКЭ на концевых поверхностях. Из-за наличия градиента давления между вогнутой и выпуклой поверхностями лопатки происходит перемещение газа в пограничных слоях на концевых поверхностях. Движение газа направлено от вогнутой поверхности к спинке. В результате взаимного влияния пограничного слоя совместно со вторичными течениями на ядро потока на выпуклой поверхности лопаток формируются парные вихри, которые вращаются в разных, друг относительно друга, направлениях. (рис. 2). Это приводит к значительным ПКЭ потока, называемых потерями вторичных течений. Из-за сложного характера динамики движения потока вплотную к концевым поверхностям до настоящего времени не существует надежной математической модели расчета этих потерь без использования экспериментальных данных. Поэтому получила широкое распространение эмпирическая формула, с помощью которой и определяют коэффициент потерь, связанных со вторичными течениями [17]. Предполагая, что потери на меридиональных поверхностях и трения на профиле одинаковы, то может быть получена формула для расчета коэффициента потерь на обеих концевых поверхностях:

$$\zeta_{конц} = 2\zeta_{пр} \frac{a}{l}, \quad (5)$$

где a – ширина канала в критическом сечении; l – длина рабочей лопатки.

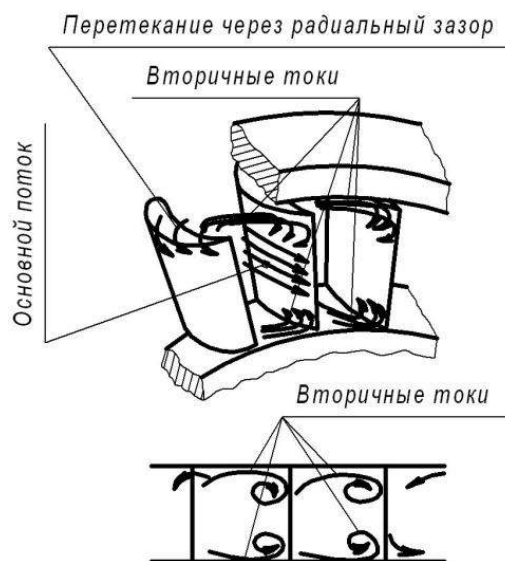


Рис. 2. Схематичный вид вторичных течений газа между двумя соседними лопатками

ПКЭ как функция от величины угла атаки на РК. Эти потери появляются благодаря отрыву потока, что приводит к неполному заполнению канала с последующим выравниванием. В областях отрыва появляются вихри, вызывающие существенные потери энергии. Они возникают в случае сильного отличия угла (β_1) вектора скорости потока в относительном движении от конструктивного угла установки входной кромки лопатки. В большинстве случаев это различие появляется при смене режима работы, однако в данной статье авторы рассматривают турбины, входящие в состав ДВС именно с импульсным наддувом. А для них, даже при постоянной окружной скорости, параметры газа перед ступенью преимущественно непостоянные. В случае, когда $\beta_1 < 90^\circ$, отрыв потока возникает на выпуклой стороне лопатки (рис. 3а), а при $\beta_1 > 90^\circ$ на вогнутой поверхности лопатки (рис. 3, б).

При необходимости вычисления уровня потерь на входе в РК – $\zeta_{отр}$, рекомендуется использовать эмпирическую формулу [18]:

$$\zeta_{отр} = k_i (1 - \zeta_{пр}) \bar{t}^2, \quad (6)$$

где \bar{t} – относительный угол атаки, $\bar{t} = \frac{\beta_{1р} - \beta_1}{\beta_{1р}}$.

Как показал анализ, формула (6), полученная на основе результатов эксперимента, хорошо подходит для расчетов характеристик ступени.

ПКЭ в условиях нестационарного обтекания ($\zeta_{нест}$) входных кромок лопаток возникают из-за изменчивого скоростного поля за СА по шагу. Взаимодействие неустановившегося потока с движущимися лопатками РК порождает вихри (рис. 4), что приводит к расходованию энергии. Основные причины появления вихрей – это контакт нестационарного потока из сопел СА с входными кромками лопаток РК; появление турбулентности в области между соседними лопатками РК из-за градиента давления в потоке; присутствие свободной турбулентности вследствие пульсаций присоединенных вихрей (циркуляции), а также из-за накопленной энергии основного потока в виде газодинамического следа за решеткой.

Методика определения потерь при пульсирующем обтекании, базируется на полуэмпирической теории турбулентных потоков, о чем говорится в работе [21]. Для полноразмерных ступеней осевых и радиальных турбин, потери от нестационарности могут быть определены следующим образом:

$$\zeta_{нест} = 0,17H, \quad (7)$$

где: H – фактор, определяющий потери от нестационарности.

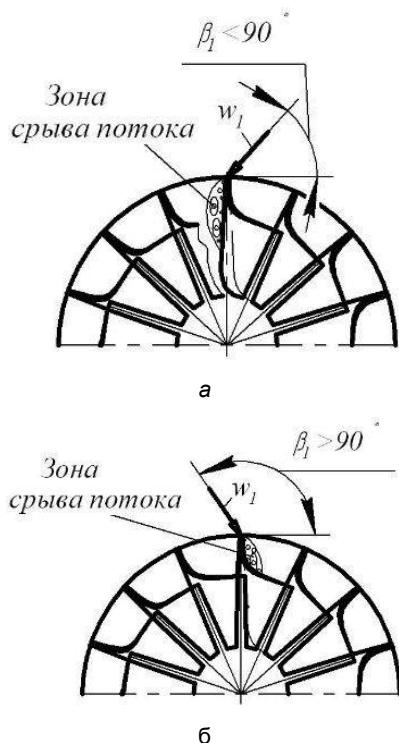


Рис. 3. Зоны стекания потока с кромок при существовании углов атаки: а – $\beta_1 < 90^\circ$; б – $\beta_1 > 90^\circ$



Рис. 4. Иллюстрация конфигурации потока за СА и в РК

$$H = \kappa_{c1}^2 \frac{S_u S_{np2}}{t_1 t_2} \frac{\sin \beta_2}{\sin^2 \alpha_1} K_m (1 + 55R),$$

где: κ_{c1} – показатель неравномерности абсолютной скорости потока; S_u – ширина закруточного следа за соплами СА; S_{np2} – длина скелетной линии лопатки; K_m – коэффициент учитывающий ПКЭ из-за турбулентности в межлопаточном канале; R – параметр, учитывающий ПКЭ от турбулентности в зазоре между СА и РК; α_1 – угол вектора скорости потока за СА; β_2 – угол вектора скорости потока за РК; t_1 – шаг рабочих лопаток на входе в колесо; t_2 – шаг лопаток на выходе из РК.

Авторы исследования [17] советуют вычислять степень неравномерности скорости потока за РК следующей зависимостью:

$$\kappa_{c1} = 0,66 \sqrt{\frac{t_1 \sin \alpha_1}{\Delta z} \zeta_{пр}},$$

где Δz – дистанция между СА и РК; $\zeta_{пр}$ – коэффициент профильных потерь.

Ширину следа за решеткой авторами предложено вычислять с помощью следующей формулы:

$$S_u = \frac{1,68 \sqrt{t_1 \sin \alpha_1} \zeta_{пр} \Delta z}{\sin \alpha_1}.$$

Коэффициент K_m задает проектировщик в зависимости от конструктивных факторов:

$$K_m = \left[2 \frac{S_{np2}}{b_2} \sin \beta_2 + \frac{1}{S_{np2}/t_2} \frac{\sin(\beta_1 + \beta_2)}{\sin \beta_1} \right],$$

где b_2 – хорда профиля рабочей лопатки (РЛ).

Функция R выражена такими геометрическими параметрами:

$$R = \frac{r_2 \sin \beta_2}{t_2 \sin \beta_1} \frac{t_2}{S_{np2}} \frac{1 - \exp(-2\pi \Delta z / t_2)}{K_m},$$

где r_2 – радиус закругления входной кромки РЛ.

Авторы работы [22] откорректировали (7) на основе экспериментальных данных, представленных в исследовании [21], что дало прекрасное соответствие с результатами расчетов, выполненных для осевых полноразмерных турбин с параметром H менее 0,6 – 0,8. Однако для центробежных малоразмерных ступеней величины параметра нестационарности могут достигать до $H = 2$ и более. В этом случае формула (7) приводит к завышенным значениям потерь, что противоречит результатам экспериментов для малоразмерных турбин. В связи с этим авторы работы [22] предложили формулу, которая лучше всего соответствует экспериментальным данным для малоразмерных и полноразмерных ступеней

$$\zeta_{нест} = 0,19(1 - e^{-1,1H}). \quad (8)$$

Поток газа в радиальном зазоре ступени. В периферийной зоне возникают дополнительные потери, связанные с расстоянием между внутренней поверхностью корпуса РОТ и внешним диаметром РК. Благодаря присутствию градиента давления между выпуклой и вогнутой поверхностями лопатки, газ проникает сквозь радиальный зазор из одной межлопаточной области в другую. Часть газа протекает через весь зазор минуя межлопаточные каналы, что приводит к потере массового расхода газа, осуществляющего работу. Кроме того, условия течения газа в межлопаточных каналах РК ухудшаются. В связи с этим мощность, снимаемая РК, снижается, что влечет за собой снижение КПД.

Для вычисления потерь в зазоре РОТ предпочтительно применять формулу, отлично согласующуюся с экспериментами, проведенными в МЭИ и МАИ [23]:

$$\zeta_{\text{заз}} = 0,45 \frac{\Delta_2}{l_2} \left(1 + \frac{1}{d_{2cp}/l_2} \right),$$

где: Δ_2 – выходной радиальный зазор РК; l_2 – минимальная высота лопатки РК; d_{2cp} – диаметр средней линии в выходном сечении РК.

Обобщив вышесказанное можно констатировать: все упомянутые потери, а также достоверность их расчета, определяют правильность вычисления характеристики турбины. По этой причине для расчета общих потерь рекомендуется использовать формулу, приведенную в работе [22]. Она успешно применяется проектировщиками при определении значений характеристик малоразмерных РОТ:

$$\zeta_{\Sigma} = (\zeta_{\text{пр}} + \zeta_{\text{конц}})_{\text{расч}} K_M K_{Re} + \zeta_{\text{нест}} + \zeta_{\text{отр}}, \quad (9)$$

где: K_{Re} – коэффициент корректировочный для учета влияния числа Рейнольдса (Re) [24]; K_M – коэффициент корректировочный для учета влияния числа Маха (M_{w2t}).

Так как режимы обтекания лопаток сильно влияют на потери, авторы работы [22] разработали методики для определения K_M , основываясь на экспериментальные показаниях различных авторов [25] относящихся к СА и РК для до- и трансзвуковых турбин.

Эффективный КПД и газодинамические характеристики РОТ

Мощность, необходимая для компенсации сил трения газа о диск РК по формуле [26]:

$$N_{\text{тр}} = \frac{C}{102} \rho u_1^2 D_1^2,$$

где: ρ – плотность газа в зазоре между диском и корпусом; u_1 – окружная скорость на внешнем диаметре РК; D_1 – максимальный диаметр РК; C – безразмерный коэффициент, являющийся функцией от Re .

$$Re = \frac{u_1 D_1 p_1 10^5}{\mu R T_1},$$

где μ – коэффициент вязкости газа.

При условии, что $Re > 5,6 \cdot 10^5, C = 0,0089 Re^{-0,2}$; а при $Re < 5,6 \cdot 10^5, C = 0,47 Re^{-0,5}$. В таком случае, удельные потери трения диска рассчитывают по формуле:

$$\Delta H_{\text{тр}} = \frac{N_{\text{тр}}}{G_T},$$

где G_T – массовый расход газа через проточную часть ступени с учетом утечек.

Удельные потери в сопловом аппарате пропорциональны несоответствию кинетической энергии газа при идеальном и действительном истечении из сопел:

$$\Delta H_{ca} = \left(\frac{1}{\varphi^2} - 1 \right) \frac{c_{ca}^2}{2},$$

где $\varphi = \sqrt{1 - \zeta_{ca}}$ – коэффициент скорости СА, ζ_{ca} – коэффициент потерь СА.

Удельные потери газа на рабочих лопатках:

$$\Delta H_{\text{рк}} = \left(\frac{1}{\psi^2} - 1 \right) \frac{w_{\text{рк}}^2}{2},$$

где $\psi = \sqrt{1 - \zeta_{\text{рк}}}$ – коэффициент скорости РК, $\zeta_{\text{рк}}$ – коэффициент потерь РК.

Удельные потери, связанные с выходной скоростью:

$$\Delta H_{\text{в}} = \frac{c_2^2}{2}.$$

Удельные потери из-за наличия перетеканий газа в радиальном зазоре:

$$\Delta H_{\text{заз}} = \zeta_{\text{заз}} H_{\text{тад}},$$

где $H_{\text{тад}}$ – адиабатный теплоперепад (располагаемый).

КПД турбины (внутренний) определяли по следующей формуле:

$$\eta_i = \frac{H_{\text{тад}} - (\Delta H_{ca} + \Delta H_{\text{рк}} + \Delta H_{\text{в}} + \Delta H_{\text{заз}} + \Delta H_{\text{тр}})}{H_{\text{тад}}}.$$

КПД турбины (эффективный)

$$\eta_T = \eta_i \eta_M,$$

где η_M – КПД (механический).

В ходе проведенного исследования по проверке правильности результатов, полученных с использованием применяемой модели расчета ступени на СР в рамках одномерного квазистационарного приближения, были выполнены расчеты газодинамических характеристик ступеней с заводскими характеристиками РОТ турбокомпрессоров: высокий наддув ТКР-14В-30, средний наддув ТКР-14С-28, ТКР-14С-27, ТКР-14С-26, низкий наддув ТКР-14Н-8А2, ТКР-14Н-9А21. Определён ряд характеристик: КПД и пропускная способность турбины с учетом коэффициента напора $\eta_T = f_1(\bar{H}_T)$ и $\mu F_T = f_2(\bar{H}_T)$.

Вычислительный процесс для математической модели течения газа в РОТ на СР, осуществлялся в прямой постановке. Определение значений коэффициентов потерь энергии основывалось на ранее приведенной зависимости (7). На рис. 5, представлен результат сравнения вычисленных с экспериментальными характеристиками, полученными в результате динамических испытаний. Сравнение выявило погрешность в диапазоне 2 - 3 %.

Заключение

1. Изложена методика вычисления ПКЭ в проточной части РОТ, которая позволяет с практически приемлемой точностью определять коэффициенты потерь в турбине.

2. Показана возможность замыкания методов для реализации вычислительной схемы для турбинной ступени на СР в одномерном квазистационарном приближении при помощи полумпирической методики расчета ПКЭ в проточной части.

3. Показана возможность получения газодинамических характеристик турбинной ступени

расчетным путем при помощи методов для расчета турбины на СР.

4. Результаты сравнения расчетных и экспериментально полученных характеристик турбинной ступени показали, что уровень относительной погрешности менее 2-3 %. Это обстоятельство подтверждает правомочность использования для замыкания модели на СР уравнением (7), а также возможность использования предложенных методов расчета на СР для определения газодинамических характеристик РОТ на стадии проектирования.

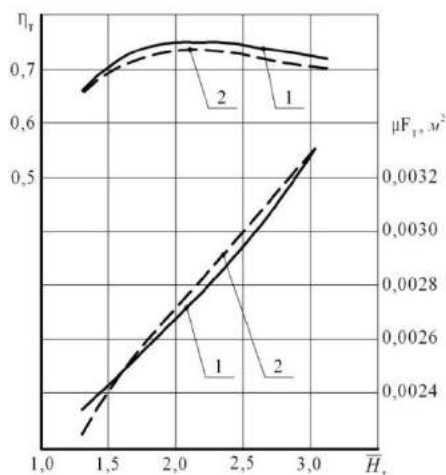


Рис. 5. Сравнение расчетных характеристик турбины с натурными: а – турбокомпрессора ТКР-14В-30, $n_{тк} = 55000 \text{ мин}^{-1}$; 1 – заводской эксперимент; 2 – расчет по одномерной модели с использованием зависимостей для определения потерь.

Литература

- 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. № 4-1 (54). С. 42-47. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.029>
- Senderov S., Vorobev S. Ensuring energy security in ASEAN countries: Current trends and major challenges // E3S Web of Conferences 27, 02002 (2018) DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20182702002>.
- Нитяговский А.В., Грибиниченко М.В., Портнова О.С., Лапин Ю.А. Экспериментальное исследование динамических характеристик роторов судовых турбогенераторов с опорами на газовой смазке // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1-1 (59). С. 129-133. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.015>
- Fershalov A.Y., Fershalov Yu.Ya., M.Y. Fershalov Microturbine with new design of nozzles // Energy 2018. V. 157. P. 615-624. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.153>.
- Fershalov A.Y., Fershalov Yu.Ya., Fershalov M.Y. Principles of designing gas microturbine stages // Energy. 2021. T. 218. С. 119488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119488>
- Юртаев А.А., Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я. и др. Оптимизация энергетической эффективности ступеней осевой микротурбины с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3-3 (45). С. 59-63. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_39950753_70376412.pdf
- Юртаев А.А., Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я., Поршкевич В.В. Методика проектирования ступеней осевых микротурбин с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3-3 (45). С. 54-58. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39950752>
- Пассар А.В., Цыганкова Л.П. Эффективность радиально-осевой турбины комбинированного судового дизеля в зависимости от выбранного значения расчетной степени реактивности // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 2 часть 1, С. 92–98. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.60.2.011>
- Новоселова Т.В., Горлова Н.Н., Медведев Г.В., Тубалов Н.П., Ситников А.А., Суржиков А.П. Использование руды монацита, при получении пористых проницаемых каталитических материалов высокотемпературным синтезом, для очистки отработавших газов дизелей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 3. С. 150-154.
- Забелин Николай Алексеевич Теплообмен и гидравлическое сопротивление в каналах прямоугольного сечения со скрещивающимся оребрением (обзор) // Теплоэнергетика. 2015. № 6. С. 40.
- Пассар А.В., Тимошенко Д.В., Бердник А.Н. Исследования радиально-осевой турбины импульсной системы наддува судового дизеля // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-1 (52). С. 74-79. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.010>
- Алексеев Г.В., Смышляев А.Б., Терешко Д.А. Разрешимость краевой задачи для стационарных уравнений тепломассопереноса при смешанных краевых условиях // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2003. Т. 43. № 1. С. 66-80.
- Володин Ю.Г., Гречухина О.Н., Матвеев Ю.И., Храмов М.Ю. Математическое моделирование течения рабочего тела в каналах судовых газотурбинных энергетических установок в пусковом режиме // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4-2 (42). С. 49-55.
- Пассар А.В., Тимошенко Д.В., Фершалов Ю.Я. Оптимальные значения угла выхода потока из соплового аппарата радиально-осевой турбины в зависимости от режима её работы // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3-1 (57). С. 129-135. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.017>.

15. Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я., Фершалов М.Ю. Эффективность малогабаритных турбинных ступеней с малыми углами выхода сопел // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-1 (39). С. 57-62. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_32717336_36997201.pdf.
16. Розенберг Г.Ш. Центростремительные турбины судовых установок. Ленинград, Судостроение, 1973. 216 с.
17. Степанов Г.Ю. Гидродинамика решеток турбомашин. Москва, Физматгиз. 1962. 512 с.
18. Жирицкий Г.С., Локай В.И., МаксUTOва М.К., Стрункин В.А. Газовые турбины двигателей летательных аппаратов. Москва, Машиностроение, 1971. 620 с.
19. Митрохин В.Т. Выбор параметров и расчет центростремительной турбины на стационарных и переходных режимах. Москва, Машиностроение, 1974. 228 с.
20. Флюгель Г. Паровые турбины. ГОНТИ - 1939. 255 с.
21. Афанасьева Н.Н., Бусурин В.Н., Гоголев И.Г. и др. Аэродинамические характеристики тепловых турбин. Ленинград, Машиностроение, 1980. 264 с.
22. Чехранов С.В., Симашов Р.П., Куликов Ю.Л., Ханькович И.Н. Методика расчета потерь кинетической энергии в сопловых и рабочих решетках при моделировании переменных режимов центростремительных МРТ // Актуальные проблемы развития и эксплуатации поршневых двигателей в транспортном комплексе Азиатско-Тихоокеанского региона: материалы Международной научн.-техн. конф. «Двигатели 2005» – Хабаровск : Изд-во Тихоокеанского гос. ун-та, 2005. – 344 с.
23. Зарянкин А.Е., Шерстюк А.Н. Радиально-осевые турбины малой мощности. Москва, Машгиз, 1963. 248 с.
24. Марков Н.М. Теория и расчет лопаточного аппарата осевых турбомашин. Ленинград, Машиностроение, 1966. 240 с.
25. Шерстюк А.Н., Зарянкин А.Е. Радиально-осевые турбины малой мощности. Москва, Машиностроение, 1976. 208 с.
26. Степанов Г.Ю. Основы теории лопаточных машин, комбинированных и газотурбинных двигателей. Москва, Машгиз, 1958. 350 с.

References

1. Kuznetsov Yuriy P., Khimich Vladimir L., Khrunkov Sergey N., Chuvakov Aleksandr B., Pogodin Roman A. Tendentsii i perspektivy razvitiya ruchnykh shlifoval'nykh pnevmaticheskikh mashin [Trends and development prospects of manual pneumatic grinding machines]. Morskije intellektual'nye tekhnologii [Marine intellectual technologies]. 2021. N 4-1 (54). S. 42-47 (in Russ). DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.029>.
2. Senderov S., Vorobev S. Ensuring energy security in ASEAN countries: Current trends and major challenges // E3S Web of Conferences 27, 02002 (2018) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20182702002>.
3. Nitiagovskii Andrei V., Gribinichenko Matvey V. Portnova, Olesya S., Lapin Yury A. Eksperimental'noe issledovanie dinamicheskikh kharakteristik rotorov sudovykh turbogeneratorov s oporami na gazovoy smazke [Experimental study of dynamic characteristics of rotors of marine turbogenerators with gas-lubricated supports]. Morskije intellektual'nye tekhnologii [Marine intellectual technologies]. 2023. N 1-1 (59). S. 129-133 (in Russ). DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.015>.
4. Fershalov Y.Y., Fershalov A.Y., Fershalov M.Y. Microturbine with new design of nozzles. Energy. 2018, V. 157, p. 615–624. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.153>.
5. Fershalov A.Y., Fershalov Y.Y., Fershalov M.Y. Principles of designing gas microturbine stages. Energy. 2021, V. 218, p. 119488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119488>
6. Yurtaev Aleksandr A., Fershalov Andrey Y., Fershalov Yuri Yakovlevich, Porshkevich Viktor V. Optimizatsiya energeticheskoy effektivnosti stupeney osevoy mikroturbiny s chastichnoy integratsiey rabocheho koleasa v soplovoyy apparat [Energy efficiency optimization of axial-flow microturbine staging with partial integration of impeller into nozzle blade cascade]. Morskije intellektual'nye tekhnologii [Marine intellectual technologies]. 2019. N 3-3 (45). S. 59-63 (in Russ). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_39950753_70376412.pdf
7. Yurtaev Aleksandr A., Fershalov Andrey Y., Fershalov Yuri Ya., Porshkevich Viktor V. Metodika proektirovaniya stupeney osevykh mikroturbin s chastichnoy integratsiey rabocheho koleasa v soplovoyy apparat [Methodology for design of axial-flow microturbine stages with partial integration of the impeller into the nozzle blade cascade]. Morskije intellektual'nye tekhnologii [Marine intellectual technologies]. 2019. N 3-3 (45). S. 54-58 (in Russ). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39950752>
8. Passar Andrey V., Tsigankova Lyudmila P. Effektivnost' radial'no-osevoy turbiny kombinirovannogo sudovogo dizelya v zavisimosti ot vybrannogo znacheniya raschetnoy stepeni reaktivnosti [Efficiency of the radial-axis turbine of a combined marine diesel engine depending on the selected value of the calculated degree of reactivity]. Morskije intellektual'nye tekhnologii [Marine intellectual technologies]. 2023. № 2 part 1, P. 92—98. (in Russ). DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.60.2.011>
9. Novoselova T.V., Gorlova N.N., Medvedev G.V., Tubalov N.P., Sitnikov A.A., Surzhikov A.P. Ispol'zovanie rudy monatsita, pri poluchenii poristyykh pronitsaemykh kataliticheskikh materialov vysokotemperaturnym sintezom, dlya ochistki otrabotavshikh gazov dizeley. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring geoursov. 2015. T. 326. № 3. S. 150-154. (in Russ).
10. Zabelin Nikolay Alekseevich Teploobmen i gidravlichesкое soprotivlenie v kanalakh pryamougol'nogo secheniya so skreshchivayushchimsya orebreniem (obzor) // Teploenergetika. 2015. № 6. S. 40. (in Russ).
11. Passar A.V., Timoshenko D.V., Berdnik A.N. Issledovaniya radial'no-osevoy turbiny impuls'noy sistemy nadduva sudovogo dizelja [Research of the radial-axial turbine of the marine diesel engine impulse turbocharging system]. Morskije intellektual'nye tekhnologii [Marine intellectual technologies]. 2021. N 2-1 (52). S. 74-79 (in Russ). DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.010>.

12. Alekseev G.V., Smyshlyaev A.B., Tereshko D.A. Razreshimost' kraevoy zadachi dlya statsionarnykh uravneniy teplomassoperenosa pri smeshannykh kraevykh usloviyakh // Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki. 2003. T. 43. № 1. S. 66-80. (in Russ).
13. Volodin YU.G., Grechukhina O.N., Matveev YU.I., Hramov M.YU. Matematicheskoe modelirovanie techeniya rabocheho tela v kanalakh sudovykh gazoturbinnnykh energeticheskikh ustanovok v puskovom rezhime // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 4-2 (42). S. 49-55. (in Russ).
14. Passar A.V., Timoshenko D.V., Fershalov Ju.Ja. Optimal'nye znachenija ugla vyhoda potoka iz soploвого apparata radial'no-osevoj turbiny v zavisimosti ot rezhima ee raboty [Optimal values of the angle of exit of the flow from the nozzle apparatus radial-axial turbine, depending on the mode of its operation]. Morskie intellektual'nye tekhnologii [Marine intellectual technologies]. 2022. N 3-1 (57). S. 129-135 (in Russ). DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.017>.
15. Fershalov A.Ju., Fershalov Ju.Ja., Fershalov M.Ju. Jeffektivnost' malogabaritnykh turbinnnykh stupeney s malymi uglami vyhoda sopel [Efficiency of the small-sized turbine stages with small outlet angle of nozzles]. [Marine intellectual technologies]. Morskie intellektual'nye tekhnologii [Marine intellectual technologies]. 2018. N 1-1 (39). S. 57-62 (in Russ.). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_32717336_36997201.pdf.
16. Rozenberg G.SH. Tsentrostremitel'nye turbiny sudovykh ustanovok. Leningrad, Sudostroenie, 1973. 216 s. (in Russ.).
17. Stepanov G.YU. Gidrodinamika reshetok turbomashin. Moskva, Fizmatgiz. 1962. 512 s. (in Russ.).
18. ZHiritskiy G.S., Lokay V.I., Maksutova M.K., Strunkin V.A. Gazovye turbiny dvigateley letatel'nykh apparatov. Moskva, Mashinostroenie, 1971. 620 s. (in Russ.).
19. Mitrokhin V.T. Vybor parametrov i raschet tsentrostremitel'noy turbiny na stacionarnykh i perekhodnykh rezhimakh. Moskva, Mashinostroenie, 1974. 228 s. (in Russ.).
20. Flyugel' G. Parovye turbiny. GONTI - 1939. 255 s. (in Russ.).
21. Afanas'eva N.N., Busurin V.N., Gogolev I.G. i dr. Aerodinamicheskie kharakteristiki teplovykh turbin. Leningrad, Mashinostroenie, 1980. 264 s. (in Russ.).
22. Chekhranov S.V., Simashov R.R., Kulikov YU.L., Han'kovich I.N. Metodika rascheta poter' kineticheskoy energii v soplovykh i rabochikh reshetkakh pri modelirovanii peremennykh rezhimov tsentrostremitel'nykh MRT // Aktual'nye problemy razvitiya i ekspluatatsii porshnevnykh dvigateley v transportnom komplekse Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona: materialy Mezhdunarodnoy nauchn.-tekhn. konf. "Dvigateli 2005" - Habarovsk : Izd-vo Tikhookeanskogo gos. un-ta, 2005. - 344 s. (in Russ.).
23. Zaryankin A.E., Sherstyuk A.N. Radial'no-osevye turbiny maloy moshchnosti. Moskva, Mashgiz, 1963. 248 s. (in Russ.).
24. Markov N.M. Teoriya i raschet lopatochnogo apparata osevykh turbomashin. Leningrad, Mashinostroenie, 1966. 240 s. (in Russ.).
25. Sherstyuk A.N., Zaryankin A.E. Radial'no-osevye turbiny maloy moshchnosti. Moskva, Mashinostroenie, 1976. 208 s. (in Russ.).
26. Stepanov G.YU. Osnovy teorii lopatochnykh mashin, kombinirovannykh i gazoturbinnnykh dvigateley. Moskva, Mashgiz, 1958. 350 s. (in Russ.).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Владимирович Пассар, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Численные методы математической физики» Вычислительного центра ДВО РАН, 680000, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65, e-mail: passar_av@mail.ru

Andrey V. Passar, Ph.D. (Eng), Senior Researcher, Computer Center of Far East Branch of the of the Russian Academy of Science. 65, Kim U Chena St., Khabarovsk, Russian Federation, 680000, e-mail: passar_av@mail.ru

Юрий Яковлевич Фершалов, доктор технических наук, профессор, профессор Отделения машиностроения, морской техники и транспорта Инженерного департамента Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: FershalovJuriy@mail.ru

Yuri Ya. Fershalov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Departments of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport, Faculty of Engineering, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, Russian Federation, 690922, e-mail: FershalovJuriy@mail.ru

Статья поступила в редакцию / the article was submitted 10.07.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing .15.08.2023.

принята к публикации/accepted for publication 22.08.2023.

Научная статья

УДК 621.438

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.007>

Управление генерацией теплоты в когенерационных газотурбинных установках с регенерацией на частичных нагрузках при различных способах нагружения

А.В. Дологлонян¹ dologlonyan@mail.ru, В.Т. Матвеев¹ mvt3900@mail.ru,

А.Г. Клименко¹ kag195877@gmail.com

¹Институт природно-технических систем,

Аннотация. Предметом рассмотрения в статье является исследование влияния перепуска воздуха мимо регенератора на характеристики когенерационных газотурбинных установок с регенерацией теплоты на частичных нагрузках при генераторном и винтовом способах нагружения. Проведенные исследования показали, что относительная теплота, переданная на теплоснабжение, возрастает, а КПД установок падает с понижением относительного расхода воздуха через регенератор при любой нагрузке. Установлено, что для микрогазотурбинных установок (МГТУ) относительная теплота, переданная на теплоснабжение, возрастает с понижением относительного расхода воздуха через регенератор и снижается при уменьшении относительной мощности. Показано, что байпасирование циклового воздуха мимо регенератора позволяет изменять потоки механической и тепловой энергии в газотурбинном двигателе независимо друг от друга. Выявлено, что на любом режиме эксплуатации МГТУ уменьшение расхода воздуха через регенератор приводит к возрастанию мощности, что необходимо учитывать в процессе регулирования.

Ключевые слова: байпасирование циклового воздуха, микрогазотурбинная установка, микротурбина, регенерация теплоты, турбина перерасширения, турбокомпрессорный утилизатор, частичные нагрузки.

Финансирование: Работа выполнена по госбюджетной теме ИПТС «Создание научных основ разработки гибких мультигенерационных установок с использованием возобновляемых источников энергии и местных ресурсов холода в условиях климатических изменений» (№ госрегистрации 121122300068-6).

Для цитирования: Дологлонян А.В., Матвеев В.Т., Клименко А.Г. Управление генерацией теплоты в когенерационных газотурбинных установках с регенерацией на частичных нагрузках при различных способах нагружения, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 59—69. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.007

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.007>

Control of heat generation in cogeneration gas turbine plants with regeneration at partial loads under various loading modes

Andrey V. Dologlonyan¹ dologlonyan@mail.ru, Valeriy T. Matviienko¹ mvt3900@mail.ru,

Alexandr G. Klimenko¹ kag195877@gmail.com

¹Institute of nature and technical systems, Russian Federation, Sevastopol

Abstract. The subject of the article is the study of the effect of air bypass past the regenerator on the characteristics of cogeneration gas turbine plants with heat recovery at partial loads with generator and screw loading modes. The conducted studies have shown that the relative heat transferred to heat supply increases, and the efficiency of the plants decreases with a decrease in the relative air flow through the regenerator at any load. It has been established that for micro gas turbine plants (MGTP) the relative heat transferred to heat supply increases with a decrease in the relative air flow through the regenerator and decreases with a decrease in the relative power. It is shown that bypassing the cycle air past the regenerator makes it possible to change the flows of mechanical and thermal energy in a gas turbine engine independently of each other. It was found that in any mode of operation of MGTP, a decrease in air flow through the regenerator leads to an increase in power, which must be taken into account in the regulation process.

Keywords: cycle air bypass, micro-gas turbine plant, microturbine warmth regeneration, overexpansion turbine, turbocharger utilizer, partial loads.

Financial Support: The work was carried out on the state budget topic of the IPTS "Creation of scientific foundations for the development of flexible multigenerational installations using renewable energy sources and local cold resources in conditions of climate change" (state registration no. 121122300068-6).

For citation: Andrey V. Dologlonyan, Valeriy T. Matviienko, Alexandr G. Klimenko Control of heat generation in cogeneration gas turbine plants with regeneration at partial loads under various loading modes, t, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 1, P. 59—69. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.007

Введение

Применение когенерационных технологий для обеспечения энергией локальных объектов

промышленности и сельского хозяйства возможно при децентрализации генерирующих мощностей. При этом тепловая и конструктивная схема когенерационной установки должна быть

приспособлена к поставке требуемого количества энергии (электрической и тепловой) для разных потребителей.

Для достижения гибкости в объемах поставки энергии и высокой тепловой эффективности газотурбинной энергетической установки можно применить не только различные тепловые и конструктивные схемы, но и управление рабочими процессами в циклах газотурбинных двигателей [1].

Гибкие когенерационные технологии могут быть применены на газотурбинных установках (ГТУ) с регенерацией теплоты, а также турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты.

Газотурбинные двигатели (ГТД) обладают способностью изменять рабочий процесс за счет управления характеристиками различных элементов двигателя. Это особенно важно, когда в качестве энергетической установки применяется комбинированная газотурбинная установка с органическим циклом Ренкина. В этом случае применение гибких технологий позволяет обеспечить потребности локального объекта в теплоте независимо от электрической нагрузки.

Изменение характеристик элементов ГТУ и через них процессов в циклах ГТД в определенных условиях может оказывать эффективное управляющее воздействие на изменение теплотехнических характеристик когенерационной ГТУ.

Выбор управляемого элемента зависит от тепловой и конструктивной схемы ГТУ, а также от регламента поставки электрической и тепловой энергии.

Изменять тепловую мощность когенерационной ГТУ с регенерацией теплоты (Р) можно посредством перепуска циклового воздуха мимо регенератора [2]. Такой способ позволяет перераспределить тепловой поток за турбиной (турбиной перерасширения) между регенератором и котлом-утилизатором. Это особенно важно при циклической или переменной тепловой нагрузке. В работе [2] были проведены исследования указанного выше способа, разработана методика расчета и определены характеристики регенеративных когенерационных ГТД на номинальном режиме.

Целью данной работы является исследование влияния перепуска воздуха мимо регенератора на характеристики когенерационных микрогазотурбинных установок с регенерацией на частичных нагрузках при генераторном и винтовом способах нагружения.

Базовые схемы ГТУ с регенерацией, теплоты работающих на органическом топливе

За основу базовой схемы когенерационной микрогазотурбинной установки (МГТУ) принят вариант ГТД простого цикла (ПЦ) с резервацией (Р) (см. рис. 1), который является одновальным для привода электрогенератора, охладитель газов ОГ2 выполняет функции глушителя и котла-утилизатора.

Усложнение ГТД ПЦ с Р предлагается осуществить за счет применения турбокомпрессорного утилизатора (ТКУ) [3-6] с целью повышения удельной мощности и эффективности ГТД (см. рис. 2). Турбина перерасширения, приводящая дожимающий компрессор (ДК) с регенератором и охладителем газа

(ОГ1) между ними, который выполняет роль котла-утилизатора, образует ТКУ. Посредством применения в рабочем цикле перерасширения рабочих газов за силовой турбиной увеличивается мощность двигателя при том же расходе топлива и, следовательно, повышается КПД двигателя.

Изменение генерации тепловой энергии осуществляется управлением байпасным клапаном (Кл), обеспечивающим байпасирование циклового воздуха мимо регенератора. Это позволяет повысить температуру газов после регенератора и увеличить количество теплоты, передаваемой на теплоснабжение через теплообменники ОГ1 и ОГ2 (см. рис. 1 и 2).

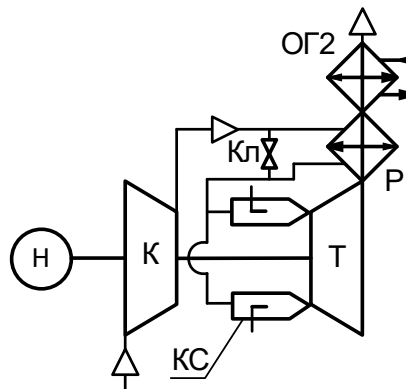


Рис. 1 – Схема когенерационной МГТУ на базе ПЦ+Р:

К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; ОГ2 – охладитель газов; Н – нагрузка; Р – регенератор; Кл – байпасный клапан

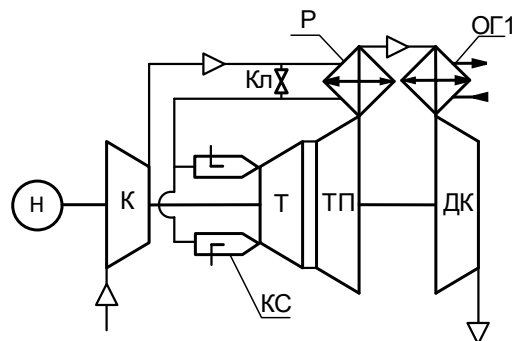


Рис. 2 – Схема когенерационной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р:

ТП – турбина перерасширения; ОГ1 – охладитель газов; ДК – дожимающий компрессор; остальные обозначения, как и на рис. 1

Методика и результаты исследования характеристик микрогазотурбинного двигателя (МГТД) с регенератором на номинальном режиме

Исследование характеристик рабочих циклов МГТД на номинальном режиме производилось с использованием физико-математических моделей и программного обеспечения, ранее опробованного при анализе параметров ГТУ, приведенных в работе [3].

В настоящее время в микрогазотурбинной технике достигнуты значительные успехи в области повышения эффективности ее элементов [7, 8]. В микрогазотурбинных установках необходимо

учитывать конструктивные факторы, влияющие на аэродинамические характеристики компрессоров и турбин [7-10]. Так КПД компрессора находится в пределах 82...86 %, охлаждаемой турбинной ступени $\eta_T = 84...86$ %, охлаждаемой турбины достигает 88...90 % при степени повышения давления в компрессоре $\pi_k = 2...6$. Начальная температура газа в микротурбине имеет значение от 1173 до 1373 К, при этом турбинная ступень высокого давления может быть неохлаждаемой. Для МГТУ характерно наличие теплообменных аппаратов, которые должны обеспечивать требуемые параметры рабочего тела в цикле, но при этом иметь оптимальные потери давления и, соответственно, габаритные размеры для микротурбинных установок. Так при применении

регенератора, габариты которого существенно зависят от конструкции теплообменной матрицы, ее плотности и площади теплопередающей поверхности, для микротурбины оптимальная степень регенерации зависит от гидравлического сопротивления регенератора и давления рабочей среды по каждой из теплообменивающихся сторон [11].

Для моделирования установок, изображенных на рисунках 1 и 2, были приняты параметры, представленные в таблице 1 (в таблице 1 г – степень регенерации).

Параметры циклов МГТД, работающих по схемам, приведенным на рисунках 1 и 2 и таблице 1, представлены в таблице 2.

Таблица 1

Параметры МГТУ

Наименование параметра	Ед. измерения	Численное значение
Адиабатный КПД турбины	–	0,88
Адиабатный КПД компрессора	–	0,8
Адиабатный КПД турбины перерасширения ¹	–	0,9
Адиабатный КПД дожимающего компрессора ²	–	0,88
КПД камеры сгорания	–	0,97
КПД электрогенератора	–	0,96
Плотность матрицы регенератора	М ² /М ³	164
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны газа для ПЦ+Р ³	–	$\varepsilon_e = \left(1 + c_e \frac{r}{1-r}\right)^{-1}$
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны газа для ПЦ+ТКУ+Р ³	–	$\varepsilon_e = \frac{1}{2c_e \varepsilon_{oe1}^2 \pi_{ок}^2} \frac{1-r}{r} \left(\sqrt{1 + 4c_e \varepsilon_{oe1}^2 \pi_{ок}^2 \frac{r}{1-r}} - 1 \right)$
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны воздуха ³	–	$\varepsilon_e = 1 - c_e \frac{r}{1-r}$
Коэффициент восстановления давления на входе в установку, $\varepsilon_{вх}$	–	0,97
Коэффициент восстановления давления в КС, $\varepsilon_{кс}$	–	0,97
Коэффициент восстановления давления на выходе из установки, $\varepsilon_{вых}$	–	0,97
Коэффициент восстановления давления на выходе из установки, $\varepsilon_{ог1}, \varepsilon_{ог2}$	–	0,96
Температура газов на выходе из ОГ1 и ОГ2	К	323
Температура окружающего воздуха	К	288
Влажность окружающего воздуха	%	60
Примечания 1, 2 – более высокие параметры компрессора и турбины связаны с масштабным эффектом в вакуумном цикле, поскольку давление рабочего тела за турбиной ниже атмосферного примерно в 2 раза, то соответственно во столько же раз размеры компрессора и турбины больше, чем у компрессора и турбины в обычном цикле. 3 – коэффициенты c_r и c_e определялись из параметров существующих прототипов [10].		

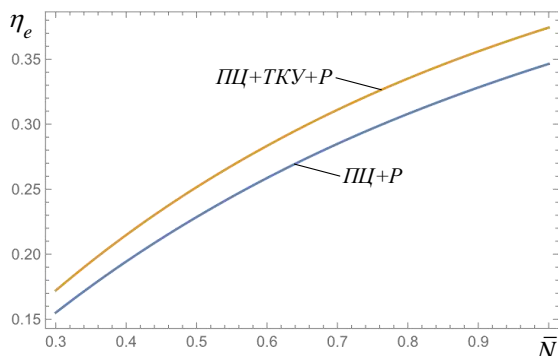
Таблица 2

Параметры МГТУ на номинальном режиме при максимальной температуре цикла $T_3 = 1373$ К

Наименование параметра	Ед. изм.	ПЦ+Р	ПЦ+ТКУ+Р
Эффективный КПД МГТУ	%	35,4	37,4
Температура газов на выходе из турбины	К	961	865
Температура газов на входе в парогенератор ОЦР	К	597	580
Оптимальная степень повышения давления в компрессоре	–	6,4	5,3
Оптимальная степень повышения давления в ДК	–	–	1,8
Оптимальная степень регенерации	–	0,875	0,83
Удельная мощность на валу силовой турбины	кДж/кг	187	244
Удельная тепловая мощность	кДж/кг	280	263
КПД теплотехнический	%	86	78

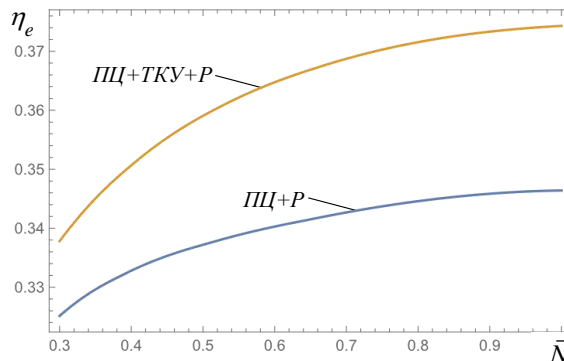
Результаты исследования характеристик МГТУ на частичных нагрузках

Анализ характеристик циклов МГТУ на частичных нагрузках производился на генераторном и винтовом режимах с заблокированной силовой турбиной и свободным ТКУ согласно методам, предложенным в работах [4, 12, 13] и опробованных, например, в



а)

работе [14]. Генераторный и винтовой режимы являются типичными для подводных и надводных судов с электродвижением, а также других локальных объектов. Результаты исследования МГТД на частичных нагрузках представлены на рис. 3 при винтовом и генераторных способах нагружения.



б)

Рис. 3 – Зависимость КПД МГТУ, изображенных на рис. 1 и 2 от относительной нагрузки при генераторном (а) и винтовом (б) способах нагружения

Из рисунка 3 видно, что эффективность схем МГТУ, изображенных на рис 1, 2 и представленных в табл. 2, распределяется без изменений и на частичных нагрузках. Также эффективность схем МГТУ, изображенных на рис 1-2 и представленных в табл. 2 при винтовом способе нагружения выше, чем при генераторном.

Результаты исследования характеристик МГТУ с байпасированием циклового воздуха мимо регенератора на номинальном режиме

В настоящей работе используются некоторые относительные параметры. Относительный расход воздуха через регенератор при перепуске определяется формулой

$$g_p = \frac{G_{sp}}{G_s},$$

где G_s – расход воздуха через компрессор, кг/с; G_{sp} – расход воздуха через регенератор, кг/с.

Относительная мощность:

$$\bar{N} = \frac{N}{N_0},$$

где N – удельная мощность МГТУ, кДж/кг; N_0 – удельная мощность МГТУ на номинальном режиме, кДж/кг.

Относительный КПД:

$$\bar{\eta}_e = \frac{\eta_e}{\eta_{e0}},$$

где η_e – КПД МГТУ; η_{e0} – КПД МГТУ на номинальном режиме.

Относительная теплота, переданная на теплоснабжение:

$$\bar{q}_u = \frac{q_u}{q_{u0}},$$

где q_u – удельная теплота, переданная на теплоснабжение через ОГ1 или ОГ2, кДж/кг; q_{u0} – удельная теплота, переданная на теплоснабжение через ОГ1 или ОГ2 на номинальном режиме, кДж/кг.

Относительный теплотехнический КПД:

$$\bar{\eta}_m = \frac{\eta_m}{\eta_{m0}},$$

где η_m – теплотехнический КПД МГТУ; η_{m0} – теплотехнический КПД МГТУ на номинальном режиме.

В свою очередь теплотехнический (общий) КПД когенерационной МГТУ представляет собой отношение полезной энергии – механической, переданной нагрузке и тепловой, переданной на теплоснабжение, к суммарной, полученной от сжигания топлива, либо другим путем.

Относительная степень расширения турбины:

$$\bar{\pi}_m = \frac{\pi_m}{\pi_{m0}},$$

где π_m – степень расширения турбины; π_{m0} – степень расширения турбины на номинальном режиме.

Относительная степень расширения турбин в МГТД на базе ПЦ+ТКУ+Р:

$$\bar{\pi}_\Sigma = \frac{\pi_\Sigma}{\pi_{\Sigma 0}},$$

где $\pi_\Sigma = \pi_m \pi_{mn}$ – степень расширения турбин; $\pi_{\Sigma 0} = \pi_{m0} \pi_{mn0}$ – степень расширения турбин на номинальном режиме; π_{mn} – степень расширения турбины перерасширения; π_{mn0} – степень расширения турбины перерасширения на номинальном режиме.

Исследования для схем МГТУ, изображенных на рис. 1 и 2, проводились при различных значениях g_p в диапазоне от 0,25 до 1 и представлены на рисунках 4 и 5.

Рисунки 4 и 5 наглядно иллюстрируют, что конфигурация ГТД ПЦ+Р обеспечивает наибольший прирост генерации тепла (до 80 %) при байпасировании циклового воздуха мимо регенератора по сравнению с ПЦ+ТКУ+Р (до 65 %), но и относительное снижение КПД (до 38 %) получается больше, чем у ПЦ+ТКУ+Р (до 25 %). При этом, можно отметить высокую стабильность

отдаваемой мощности, относительные изменения которой не превышают 5 %.

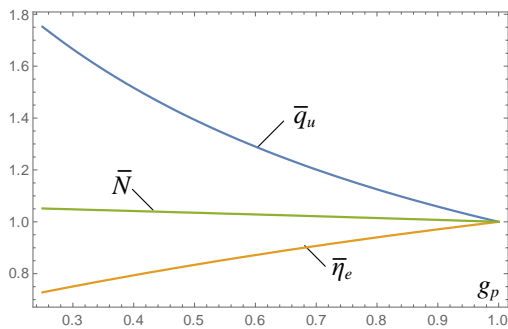


Рис. 4 – Зависимость относительных параметров: КПД (η_e), теплоты (\bar{q}_u), переданной на теплоснабжение, и мощности (\bar{N}) от относительного расхода через регенератор для МГТУ на базе ПЦ+Р

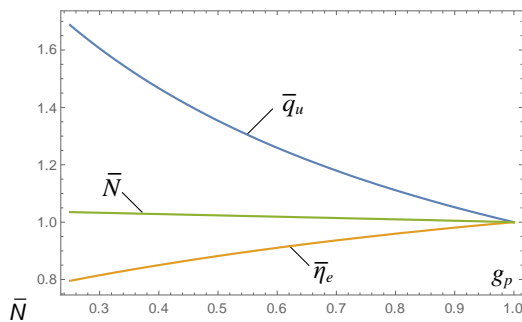
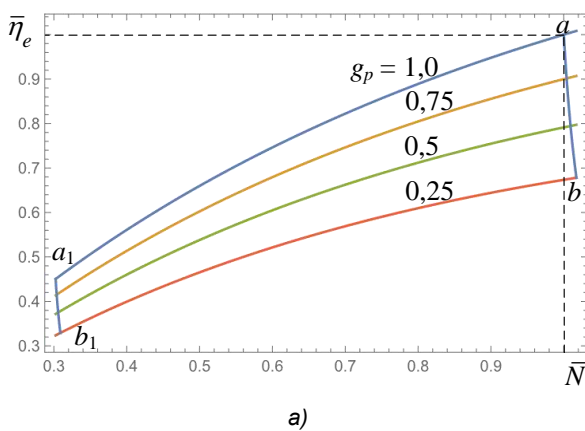


Рис. 5 – Зависимость относительных параметров: КПД (η_e), теплоты (\bar{q}_u), переданной на теплоснабжение, и мощности (\bar{N}) от относительного расхода через регенератор для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р

Результаты исследования характеристик МГТУ с байпасированием циклового воздуха мимо регенератора на частичных нагрузках

Исследования характеристик МГТУ, изображенных на рис. 1 и 2, проводились при



различных значениях g_p в диапазоне от 0,25 до 1 и относительной нагрузки (\bar{N}) от 0,3 до 1 при $g_p = 1$ (при $g_p < 1$ мощность на номинальном режиме немного возрастает [2]) представлены на рисунках 6-13.

Анализ рисунка 6 показывает, что относительный КПД МГТУ на базе ПЦ+Р снижается как при уменьшении относительной мощности, так и относительного расхода воздуха через регенератор, но при винтовом способе нагружения это снижение заметно меньше, что вполне очевидно (см. рис. 3). Рисунок 7 наглядно иллюстрирует, что относительная теплота, переданная на теплоснабжение, возрастает с понижением относительного расхода воздуха через регенератор и снижается при уменьшении относительной мощности. Это характерно для любого способа нагружения. Однако возможности манипулирования теплотой, передаваемой на теплоснабжения при винтовом способе нагружения значительно ниже, чем при генераторном. Это связано с тем, что снижение мощности ГТД на базе ПЦ+Р на генераторном режиме осуществляется в основном за счет максимальной температуры цикла, при этом уменьшение степени расширения в турбине наблюдается весьма умеренное [13] (см. рис. 8а). При винтовом способе нагружения снижение мощности осуществляется в основном за счет уменьшения расхода рабочего тела, при этом наблюдается существенное уменьшение степени расширения в турбине [13] (см. рис. 8б). А поскольку \bar{q}_u прямо пропорциональна расходу рабочего тела, то и диапазон возможностей манипулирования теплотой на винтовом режиме существенно снижается с уменьшением нагрузки. Из рисунка 8 видно, что относительная степень расширения в турбине ($\bar{\pi}_m$) зависит в основном от изменения нагрузки и практически не зависит от изменения g_p . Рисунок 9 демонстрирует, что диапазон изменения теплотехнического КПД мало зависит от способа нагружения МГТД и понижается с уменьшением относительной нагрузки, а при снижении g_p – возрастает.

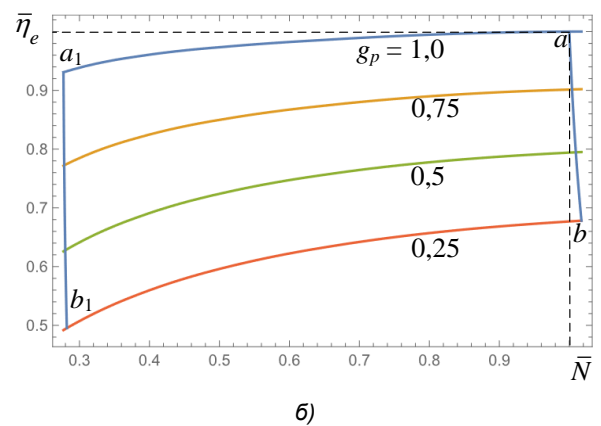


Рис. 6 – Зависимость относительного КПД (η_e) от относительной мощности (\bar{N}) при различных значениях g_p для МГТУ на базе ПЦ+Р: а) генераторный способ нагружения; б) винтовой способ нагружения

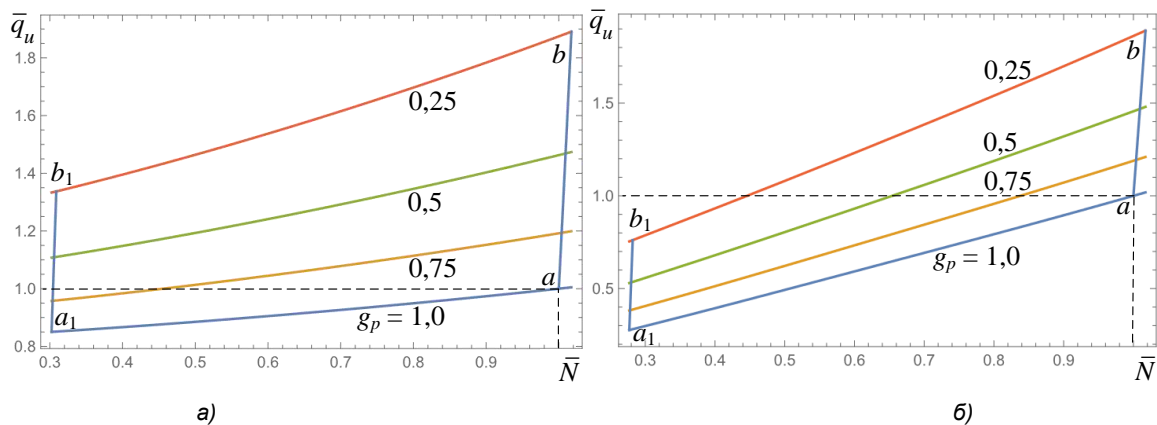


Рис. 7 – Зависимость относительной теплоты (\bar{q}_u), переданной на теплоснабжение от относительной мощности (\bar{N}) при различных значениях g_p для МГТУ на базе ПЦ+Р: а) генераторный способ нагружения; б) винтовой способ нагружения

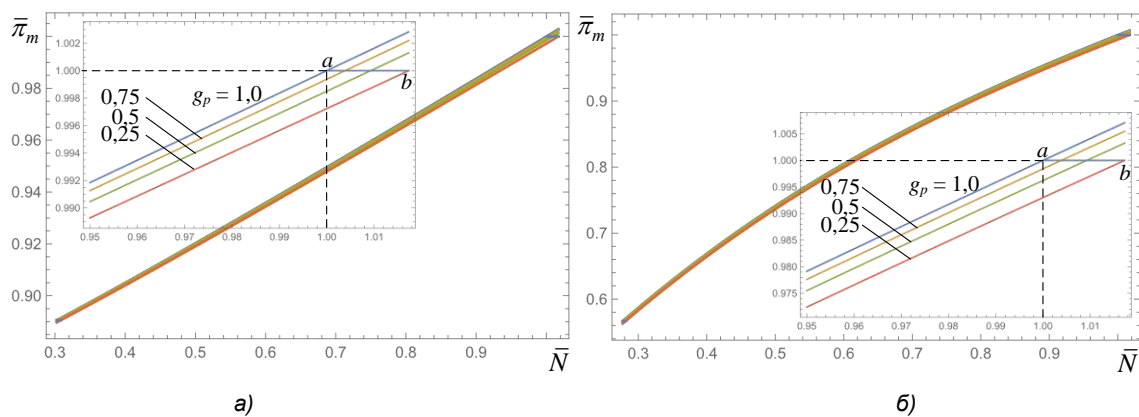


Рис.8 – Зависимость относительной степени расширения турбины ($\bar{\pi}_m$) от относительной мощности (\bar{N}) при различных значениях g_p для МГТУ на базе ПЦ+Р: а) генераторный способ нагружения; б) винтовой способ нагружения

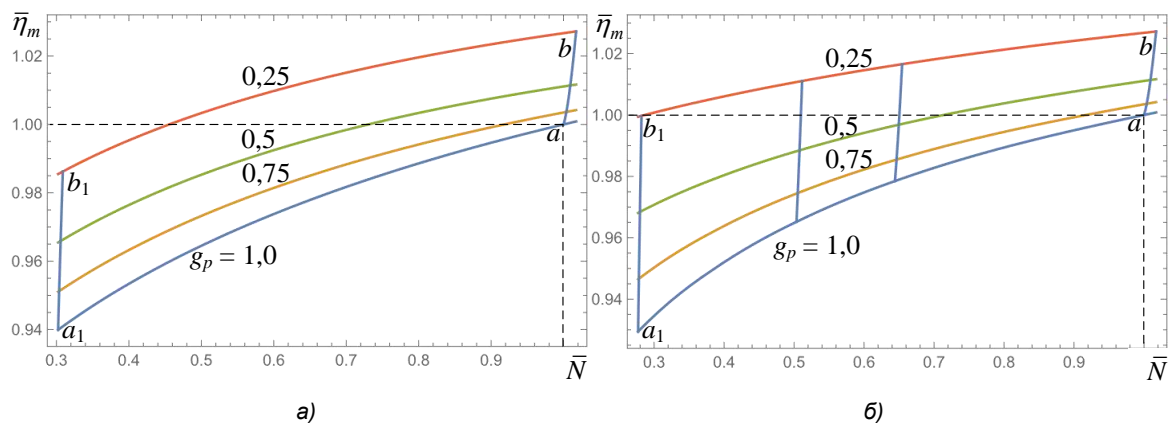


Рис. 9 – Зависимость относительного теплотехнического КПД ($\bar{\eta}_m$) от относительной мощности (\bar{N}) при различных значениях g_p для МГТУ на базе ПЦ+ Р: а) генераторный способ нагружения; б) винтовой способ нагружения

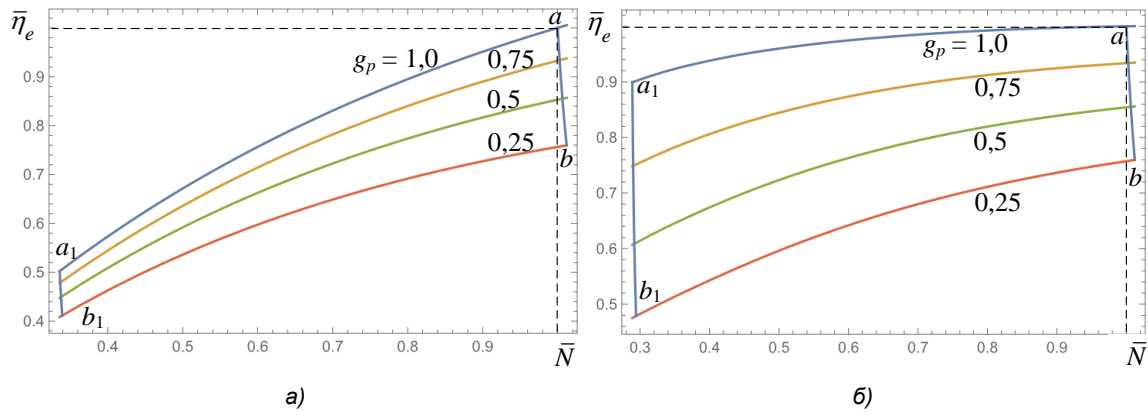


Рис. 10 – Зависимость относительного КПД ($\bar{\eta}_e$) от относительной мощности (\bar{N}) при различных значениях g_p для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р: а) генераторный способ нагружения; б) винтовой способ нагружения

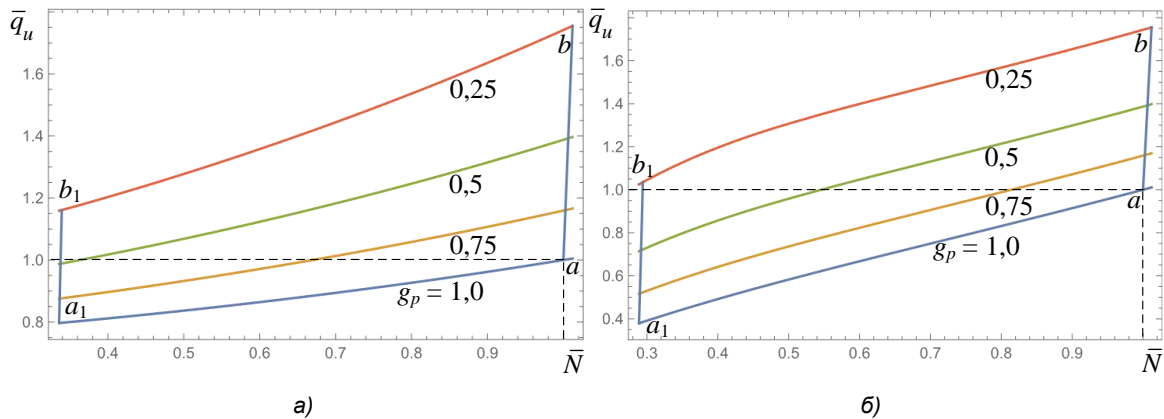


Рис. 11 – Зависимость относительной теплоты (\bar{q}_u), переданной на теплоснабжение от относительной мощности (\bar{N}) при различных значениях g_p для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р: а) генераторный способ нагружения; б) винтовой способ нагружения

Анализ рисунка 10 показывает, что относительный КПД МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р заметно снижается как при уменьшении относительной мощности, так и относительного расхода воздуха через регенератор, хотя это снижение и менее заметно при генераторном способе нагружения, а при винтовом способе нагружения это снижение существенно меньше, что аналогично МГТУ на базе ПЦ+Р (см. рис. 6). Рисунок 11 демонстрирует, что относительная теплота,

переданная на теплоснабжение, возрастает с понижением относительного расхода воздуха через регенератор и увеличением относительной мощности. Как и в случае с МГТУ на базе ПЦ+Р возможности манипулирования теплотой, передаваемой на теплоснабжения при винтовом способе нагружения значительно ниже, чем при генераторном, однако больше, чем у МГТУ на базе ПЦ+Р на винтовом режиме (см. рис. 7а и 11а).

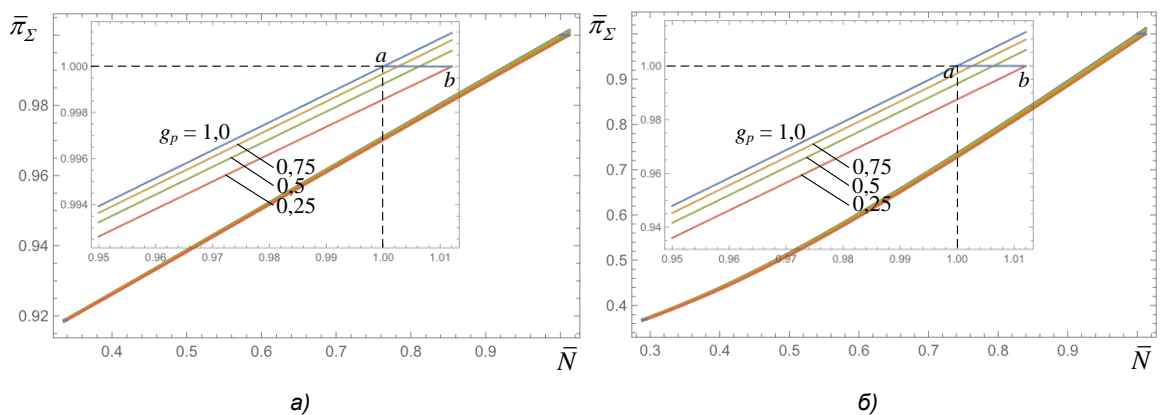


Рис. 12 – Зависимость относительной суммарной степени расширения ($\bar{\pi}_\Sigma$) от относительной мощности (\bar{N}) при различных значениях g_p для на базе МГТУ ПЦ+ТКУ+Р: а) генераторный способ нагружения; б) винтовой способ нагружения

Следует отметить, что поведение относительной теплоты при уменьшении относительной мощности связано характером изменения параметров турбины и турбины перерасширения, а именно суммарной степени расширения ($\bar{\pi}_\Sigma$) (см. рис. 12). При винтовом способе нагружения для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р $\bar{\pi}_\Sigma$ снижается быстрее, чем $\bar{\pi}_m$ для МГТУ на базе ПЦ+Р (см. рис. 8б и 12б). Поэтому температура на входе в котел-утилизатор (ОГ1) мало зависит от нагрузки (см. рис. 13б). Следовательно, для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р \bar{q}_u снижается

значительно менее интенсивно, чем для МГТУ на базе ПЦ+Р (см. рис. 7б и 11б), то и теплотехнический КПД растет с понижением нагрузки (см. рис. 14б). Теплотехнический КПД установки на базе ПЦ+ТКУ+Р при генераторном способе нагружения (см. рис. 14а) изменяется аналогично, что и для МГТУ на базе ПЦ+Р, однако диапазон существенно выше, что связано с более высоким (примерно в 1,5 раза) значением π_Σ по сравнению с π_m (см. рис. 8а и 12а), и как следствие низкими температурами ($T_{OГ1}$) на входе в ОГ1 (см. рис. 13а), особенно на малых нагрузках.

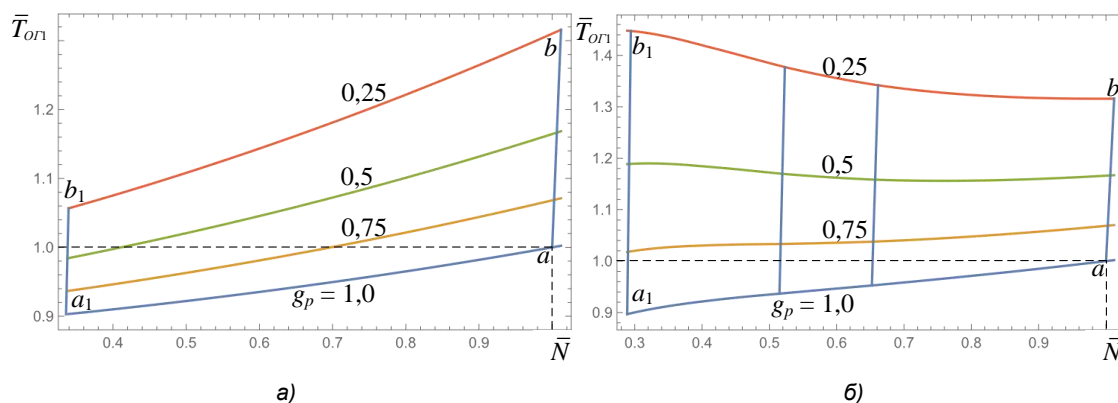


Рис. 13 – Зависимость относительной температуры на входе в ОГ1 ($\bar{T}_{OГ1}$) от относительной мощности (\bar{N}) при различных значениях g_p для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р: а) генераторный способ нагружения; б) винтовой способ нагружения

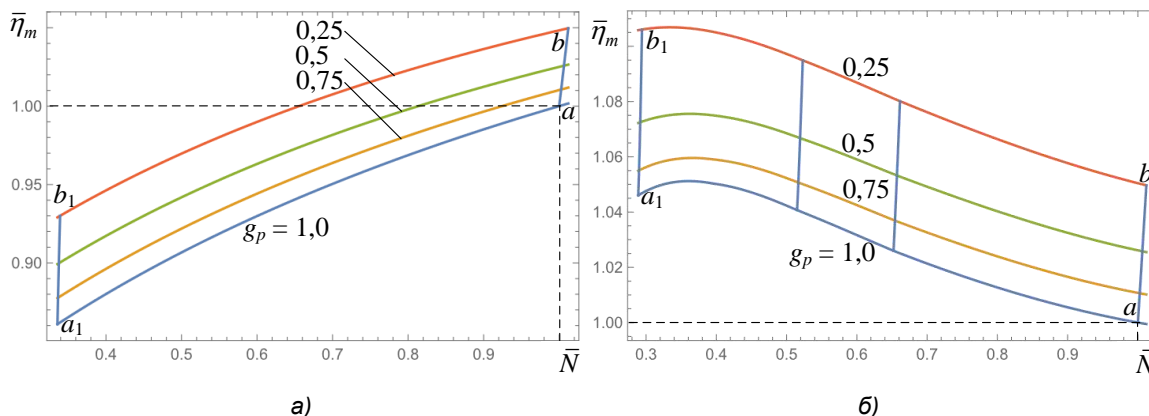


Рис. 14 – Зависимость относительного теплотехнического КПД ($\bar{\eta}_m$) от относительной мощности (\bar{N}) при различных значениях g_p для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р: а) генераторный способ нагружения; б) винтовой способ нагружения

Как и для МГТУ на базе ПЦ+Р кривые ab и a_1b_1 (см. рис. 10-14) показывают, что на любом режиме эксплуатации МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р уменьшение g_p также приводит к некоторому возрастанию мощности.

Следует отметить, что рост теплоты \bar{q}_u для установок на базе ПЦ+ТКУ+Р заметно ниже, чем на ПЦ+Р, особенно при малых относительных нагрузках. Это связано с более высокой эффективностью МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р. Таким образом, чтобы поддерживать постоянное количество теплоты, передаваемой на теплоснабжение, для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р необходимо больше байпасировать воздуха мимо регенератора, чем для МГТУ на базе ПЦ+Р. Кроме

того, при винтовом способе нагружения возможности для манипулирования \bar{q}_u ниже, чем при генераторном для обеих схем МГТУ.

Проведенные выше исследования показали, что наиболее подходящими для когенерации являются газотурбинные установки с регенерацией, поскольку позволяют за счет байпасирования циклового воздуха мимо регенератора манипулировать потоками механической и тепловой энергии в ГТД независимо друг от друга, чем обеспечивают потребителя как в базовом, так и маневровом режимах теплотой независимо от степени нагружения. Подобное не могут продемонстрировать ни двигатели внутреннего сгорания, ни паротурбинные установки любой конфигурации.

Заключение

Исследование влияния перепуска воздуха мимо регенератора на характеристики когенерационных микрогазотурбинных установок с регенерацией теплоты на частичных нагрузках при генераторном и винтовом способах нагружения показали:

1. Относительная теплота, переданная на теплоснабжение, возрастает, а КПД установок падает с понижением относительного расхода воздуха через регенератор при любых нагрузках и способах нагружения.

2. Для МГТУ как на базе ПЦ+Р, так и на базе ПЦ+ТКУ+Р относительная теплота, переданная на теплоснабжение, возрастает с понижением относительного расхода воздуха через регенератор и снижается при уменьшении относительной мощности при любых способах нагружения. Однако диапазон изменения относительной теплоты для МГТУ как на базе ПЦ+Р существенно выше.

3. Использование байпасирования воздуха мимо регенератора для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р целесообразно при нагрузках близких к средним и номинальным, а для МГТУ на базе ПЦ+Р – во всем диапазоне нагружения.

4. На любом режиме эксплуатации МГТУ уменьшение g_p приводит к некоторому возрастанию мощности, что необходимо учитывать в процессе регулирования.

5. Теплотехнический КПД когенерационных МГТУ для генераторного способа нагружения увеличивается с понижением относительного расхода воздуха через регенератор и уменьшается с понижением мощности. Для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р при винтовом способе нагружения наблюдается рост теплотехнического КПД с понижением нагрузки. Во всех случаях колебания его не очень значительны, что говорит о высокой эффективности использования топлива.

6. Байпасирование циклового воздуха мимо регенератора позволяет изменять потоки механической и тепловой энергии в ГТД независимо друг от друга, тогда как у ГТД без регенерации потоки тепловой и механической энергии жестко связаны между собой. Это делает установки с регенерацией наиболее предпочтительными среди когенерационных. При генераторном способе нагружения возможности манипулирования тепловой энергией шире, чем при винтовом.

Литература

1. Матвеев В.Т. Гибкие когенерационные технологии в газотурбинной установке сложного цикла с турбиной перерасширения / В.Т. Матвеев, В.А. Очеретяный // Промышленная теплотехника. 2007. Т. 29. № 7. С. 97-101.
2. Дологлонян А.В. Управление генерацией тепла в циклах микрогазотурбинных установок с регенерацией теплоты / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2021. № 3 (347). С. 3-11.
3. Матвеев В.Т. Глубокая утилизация теплоты в газотурбинных двигателях с турбиной перерасширения / В.Т. Матвеев // Промышленная теплотехника. 1997. Т. 19. № 4-5. С. 81-85.
4. Matvienko V. Variable regimes operation of cogenerative gas -turbine engines with overexpansion turbine/ V.Matvienko, V. Ocheretianiy// Prococoligs of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air 'GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.
5. Matviienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex / V. Matviienko, O. Andriets, V. Ochretianijy // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany.
6. Matviienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V/ Matviienko, V. Ocheretianiy // Prococoling of ASME Turbo Expo 2016: June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.
7. Diener OF, van der Spuy SJ, von Backström TW, Hildebrandt T. Multi-Disciplinary Optimization of a Mixed-Flow Compressor Impeller. ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 8: Microturbines, Turbochargers and Small Turbomachines; Steam Turbines (:V008T23A021. doi:10.1115/GT2016-57008.
8. Deng, Qing-Hua & Shao, Shuai & Fu, Lei & Luan, Hai-Feng. (2018). An Integrated Design and Optimization Approach for Radial Inflow Turbines – Part I: Automated Preliminary Design. Applied Sciences. 8. 2038. 10.3390/app8112038.
9. Арбеков А.Н. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок / А.Н. Арбеков, А.Ю. Варакин, Э.А. Мнушин, В.Е и др. М. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 678 с.
10. Vick, Michael & Young, Trent & Kelly, Matthew & Tuttle, Steven & Hinnant, Katherine. (2016). A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests. V008T23A030. 10.1115/GT2016-57780.
11. Дологлонян А.В. Оптимизация степени регенерации для циклов микрогазотурбинных установок / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2020. № 3 (341). С. 59-66.
12. Матвеев В.Т. Теплотехнические характеристики когенерационных газотурбогенераторов с регенерацией теплоты при переменном режиме работы // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Харьков: НАУ «ХАИ», 2001 Вып. 23 С. 95-98.
13. Переходные процессы в газотурбинных установках / Под ред. д-ра техн. наук, проф. И. В. Котляра. Ленинград: Машиностроение. [Ленингр. отд-ние], 1973. 254 с.
14. Матвеев В.Т. Переменные режимы работы замкнутых газотурбинных установок в пропульсивных комплексах подводной техники / В.Т. Матвеев, А.В. Дологлонян, В.А. Очеретяный, // Морские интеллектуальные технологии. С.-Петербург. НИЦ МИТ, 2020. № 3(49). Т.1. С. 77-83.

References

1. Matveenko V.T. Gibkie kogeneracionnye tekhnologii v gazoturbinoj ustanovke slozhnogo cikla s turbinoj pererasshireniya [Flexible cogeneration technologies in a complex cycle gas turbine plant with a overexpansion turbine] / V.T. Matveenko, V.A. Ocheretyanyj // Promyshlennaya teplotekhnika. 2007. T. 29. № 7. S. 97-101.
2. Dologlonyan A.V. Upravlenie generaciej tepla v ciklah mikrogazoturbinyh ustanovok s regeneraciej teploty / A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2021. № 3 (347). S. 3-11.
3. Matveenko V.T. Glubokaya utilizatsiya teploty v gazoturbinyh dvigatelyah s turbinoj pererasshireniya [Control of heat generation in cycles of micro gas turbine plants with heat recovery] / V.T. Matveenko // Promyshlennaya teplotekhnika. 1997. T. 19. № 4-5. S. 81-85.
4. Matviinko V. Variable regimes operation of cogenerative gas -turbine engines with overexpansion turbine / V. Matviinko, V. Ocheretianiy // Prococoligs of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air 'GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.
5. Matviienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex / V. Matviienko, O. Andriets, V. Ochretianij // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany.
6. Matviienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V. Matviienko, V. Ocheretianiy // Prococoling of ASME Turbo Expo 2016: June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.
7. Diener OF, van der Spuy S.J, von Backström TW, Hildebrandt T. Multi-Disciplinary Optimization of a Mixed-Flow Compressor Impeller. ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 8: Microturbines, Turbochargers and Small Turbomachines; Steam Turbines ():V008T23A021. doi:10.1115/GT2016-57008.
8. Deng, Qing-Hua & Shao, Shuai & Fu, Lei & Luan, Hai-Feng. (2018). An Integrated Design and Optimization Approach for Radial Inflow Turbines – Part I: Automated Preliminary Design. Applied Sciences. 8. 2038. 10.3390/app8112038.
9. Arbekov A.N. Teoriya i proektirovanie gazoturbinyh i kombinirovannyh ustanovok [Theory and design of gas turbine and combined plants] / A.N. Arbekov, A.YU. Varaksin, E.A. Mnushin, V.E i dr. M.: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, 2017. 678 s.
10. Vick, Michael & Young, Trent & Kelly, Matthew & Tuttle, Steven & Hinnant, Katherine. (2016). A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests. V008T23A030. 10.1115/GT2016-57780.
11. Dologlonyan A.V. Optimizatsiya stepeni regeneratsii dlya ciklov mikrogazoturbinyh ustanovok [Optimization of the regeneration degree for cycles of micro gas turbine plants] / A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2020. – № 3 (341). – S. 59-66.
12. Matveenko V.T. Teplotekhnicheskie harakteristiki kogeneratsionnyh gazoturbogeneratorov s regeneraciej teploty pri peremennom rezhime raboty [Thermotechnical characteristics of cogeneration gas turbine generators with heat recovery in variable operation mode] // Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya: sb. nauch. tr. Har'kov: NAU «HAL», 2001 Vyp. 23 S. 95-98.
13. Perekhodnye processy v gazoturbinyh ustanovkakh [Transient processes in gas turbine plants] / Pod red. d-ra tekhn. nauk, prof. I. V. Kotlyara. Leningrad: Mashinostroenie. [Leningr. otd-nie], 1973. 254 s.
14. Matveenko V.T. Peremennye rezhimy raboty zamknutyh gazoturbinyh ustanovok v propul'sivnyh kompleksah podvodnoj tekhniki [Variable modes of operation of closed gas turbine plants in propulsion complexes of underwater equipment] / V.T. Matveenko, A.V. Dologlonyan, V.A. Ocheretyanyj // Morskie intellektual'nye tekhnologii. S.-Peterburg. NIC MIT, 2020. № 3(49). T.1. S. 77-83.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Вартазарович Дологлонян ФГБНУ Институт природно-технических систем Российской Федерации, г. Севастополь Кандидат технических наук, зав. Лабораторией E-mail: dologlonyan@hotmail.com

Andrey V. Dologlonyan FSBSI Institute of nature and technical systems, Russian Federation, Sevastopol Ph.D., Chief of Laboratory, E-mail: dologlonyan@hotmail.com

Валерий Тимофеевич Матвеевко ФГБНУ Институт природно-технических систем Российской Федерации, г. Севастополь Доктор технических наук, гл. науч. сотр. E-mail: mvt3900@mail.ru

Valeriy T. Matviienko FSBSI Institute of nature and technical systems, Russian Federation, Sevastopol Dr. Sci., Chief Researcher E-mail: mvt3900@mail.ru

Александр Георгиевич Клименко Институт природно-технических систем Российской Федерации, г. Севастополь Ведущий инженер E-mail: kag195877@gmail.com

Valeriy T. Matviienko Institute of nature and technical systems, Russian Federation, Sevastopol Leading engineer E-mail: kag195877@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 09.08.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 21.08.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 24.08.2023.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.008>

Устойчивость системы наведения автономных подводных аппаратов в присутствии подводных течений

Б.А. Скороход¹ boris.skorohod@mail.ru, П.В. Жилияков¹ yany_@mail.ru

¹Севастопольский государственный университет

Аннотация. В статье рассматривается задача наведения автономных подводных аппаратов (АПА) на заданный объект в горизонтальной плоскости при действии неконтролируемого постоянного течения. Управление формируется по изображениям, поступающих с видеокамеры или гидроакустического датчика, измеряя угол визирования, характеризующий положение объекта. Наш подход основывается на методах теории устойчивости, позволяющих обеспечить желаемое поведение АПА. Специфика рассматриваемой задачи анализа устойчивости определяется ее терминальным характером – правые части замкнутой управляемой системы имеют сингулярную точку в момент окончания процесса наведения. Это обстоятельство существенно затрудняет решение задачи, не позволяя использовать известные методы. Мы формализуем поведение АПА в виде определенных устойчивости, разрабатываем подход к анализу их устойчивости, основанный на методе функций Ляпунова, и предлагаем критерии устойчивости. Полученные результаты иллюстрируются компьютерным моделированием.

Ключевые слова: системы с неполным приводом, автономные подводные аппараты, функции Ляпунова, сингулярная точка

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение Минобрнауки РФ № 075-03-2021-092/5 от 29.09.2021, FEFM-2021-0014 № 121111600136-3, а также Программа «Приоритет2030».

Для цитирования: Скороход Б.А., Жилияков П.В. Устойчивость системы наведения автономных подводных аппаратов в присутствии подводных течений, Морские интеллектуальные технологии 2023. № 3 часть 1, С. 70—78. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.008

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.008>

Stability of the guidance system of autonomous underwater vehicles in the presence of underwater currents

Boris A. Skorohod¹ boris.skorohod@mail.ru, Pavel V. Zhilyakov¹ yany_@mail.ru

¹Sevastopol State University, Russian Federation

Abstract. The article deals with the problem of guidance autonomous underwater vehicles (AUV) to a given object in a horizontal plane under the action of an uncontrolled constant current. The control is formed from images coming from a video camera or a hydroacoustic sensor, measuring the angle of sight that characterizes the position of the object. Our approach is based on the methods of stability theory, which allow us to ensure the desired behavior of the AUV. The specificity of the stability analysis problem under consideration is determined by its terminal nature – the right parts of a closed controlled system have a singular point at the end of the guidance process. This circumstance significantly complicates the solution of the problem, not allowing the use of known methods. We formalize the desired behavior of APAS in the form of stability definitions, develop an approach to the analysis of their stability based on the Lyapunov function method, and propose stability criteria. The proposed results are illustrated by computer modeling.

Keywords: underactuated systems, autonomous underwater vehicles, Lyapunov function, singular point

Financial Support: The research is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, FEFM-2021-0014 № 121111600136-3.

For citation: Boris A. Skorohod, Pavel V. Zhilyakov, Stability of the guidance system of autonomous underwater vehicles in the presence of underwater currents. 2023. № 3 part 1, P. 70—78. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.008

Введение

Задачи наведения на заданный объект автономных подводных аппаратов (АПА) в различных сценариях их функционирования, относятся к одному из важных направлений исследований в области подводной робототехники [1–7]. Проблемы, связанные с решением подобных

задач, обусловлены тем, что АПА представляют собой сложные объекты с точки зрения разработки систем управления из-за их нелинейной кинематики, динамики и непредсказуемой окружающей среды [8]. В этой работе рассматривается задача наведения АПА в горизонтальной плоскости при действии неконтролируемого постоянного течения. Управление формируется по изображениям,

поступающих с видеокамеры (до 30м при подсветке объекта [4]) или гидроакустического датчика, измеряя угол визирования, характеризующий положение объекта (например, его центроида). Наш подход основывается на методах теории устойчивости, позволяющих обеспечить желаемое поведение АПА. Специфика, рассматриваемой задачи анализа устойчивости определяется ее терминальным характером – правые части замкнутой управляемой системы имеют сингулярную точку в момент окончания процесса наведения. Это обстоятельство существенно затрудняет решение задачи, не позволяя использовать известные методы. В случае линейных терминальных систем с сингулярной точкой определения устойчивости и получение условий с помощью преобразования Лапласа их обеспечивающих были предложены в [9]. Мы обобщаем эти определения на случай нелинейных моделей, разрабатываем подход к анализу их устойчивости, основанный на методе функций Ляпунова, и предлагаем критерии устойчивости. Полученные результаты иллюстрируются компьютерным моделированием.

1. Уравнения движения АПА

Рассматривается модель АПА в горизонтальной плоскости, учитывающая присутствие постоянного течения, которая может быть получена, используя инерциальную $\{N\}$ и связанную системы $\{B\}$ координат, показанные на рис.1. Кинематические и динамические уравнения такой модели описываются, соответственно, уравнениями [8]

$$\dot{\eta} = R(\eta)v, \quad (1)$$

$$M \dot{v}_r + C(v_r)v_r + Dv_r = \tau, \quad (2)$$

где $\eta = (x, y, \psi)^T$, x, y – координаты центра масс АПА в $\{N\}$, ψ – курсовой угол, $v = (u, v, r)^T$, u, v, r – продольная, поперечная и угловая скорости АПА в $\{B\}$, $\tau = (\tau_u, 0, \tau_\psi)^T$ – вектор управляющих воздействий, v_r – скорость АПА относительно водной среды, $v_r = (u - u_c, v - v_c, r)^T$, u_r, v_r – линейные скорости АПА относительно течения, u_c, v_c – проекции скорости течения на продольную и поперечную оси связанной системы координат $\{B\}$, соответственно,

$$R(\psi) = \begin{pmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, M = \begin{pmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix},$$

$$C(v_r) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v_r - m_{23}r \\ 0 & 0 & m_{11}u_r \\ m_{22}v_r + m_{23}r & -m_{11}u_r & 0 \end{pmatrix},$$

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & d_{23} \\ 0 & d_{32} & d_{33} \end{pmatrix}, s\psi = \sin(\psi), c\psi = \cos(\psi).$$

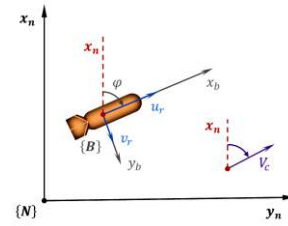


Рис. 1. Инерциальная и связанная системы координат в горизонтальной плоскости

2. Постановка задачи

Управляющее воздействие системой (1), (2) ищется, используя метод погони [5]

$$\tau_\psi = k_\psi (\psi - \psi_t) = k_\psi \left[\psi - \arctg \left(\frac{y_f - y}{x_f - x} \right) \right], \quad (3)$$

где углы ψ, ψ_t показаны на рис.2, k_ψ – параметр.

Для обеспечения желаемой продольной скорости u_d , используется пропорционально-интегральный регулятор

$$\tau_u = k_{Pu}(u_d - u_r) + k_{Iu} \int_0^t (u_d - u_r) ds, \quad (4)$$

где k_{Pu}, k_{Iu} – параметры.

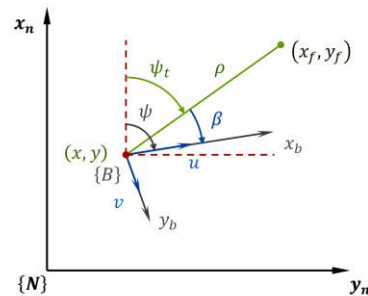


Рис. 2. Кинематика сближения

Преобразовывая уравнения кинематики с помощью замены координат

$$x_f - x = \rho \cos(\psi - \beta), \quad (4a)$$

$$y_f - y = \rho \sin(\psi - \beta), \quad (4b)$$

где $\rho = ((x_f - x)^2 + (y_f - y)^2)^{1/2}$, находим

$$\dot{\rho} = -(u_r + u_c)c\beta + (v_r + v_c)s\beta, \quad (5a)$$

$$\dot{\beta} = r + \frac{u_r + u_c}{\rho} s\beta + \frac{v_r + v_c}{\rho} c\beta, \quad (5b)$$

$$\dot{\psi} = r. \quad (5c)$$

Соотношения (2) - (5) образуют замкнутую систему уравнений, в которой правая часть уравнения (5b) имеет сингулярную точку – обращается в бесконечность в момент окончания наведения АПА. Это обстоятельство существенно осложняет ее исследование с использованием известных по литературе методов. Опишем, предлагаемый далее в работе подход к анализу поведения системы (2) - (5). Полагая, что АПА не пересекает точку $\rho = 0$ при $t > 0$, рассмотрим три возможных типа поведения системы для возрастающей последовательности начальных дальностей до цели $\rho_0^1 < \rho_0^2 < \dots < \rho_0^n$, ошибок по координате y и траектории движения АПА, показанные на рис. 3 - 5.

В первом случае предполагается, что $u_c = 0, v_c = 0$ и наведение завершается приведением АПА в окрестность цели. На рис. 3 показаны результаты моделирования. Видно, что с увеличением начальной дальности точность наведения увеличивается.

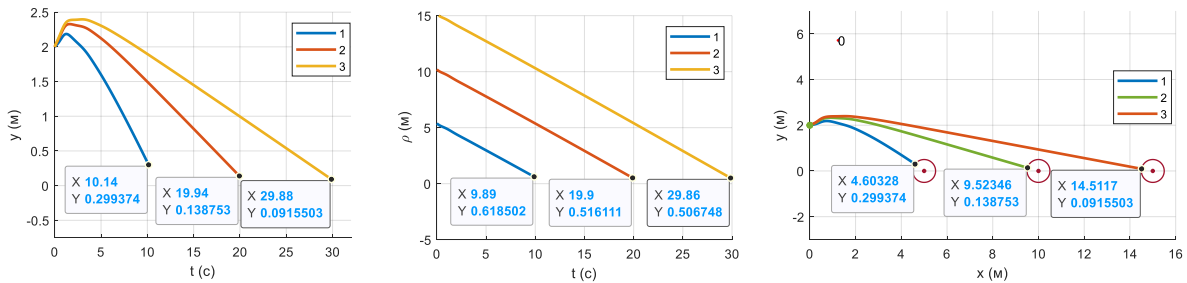


Рис. 3. Зависимости ошибки по y , дальности до цели от времени и траектории движения АПА

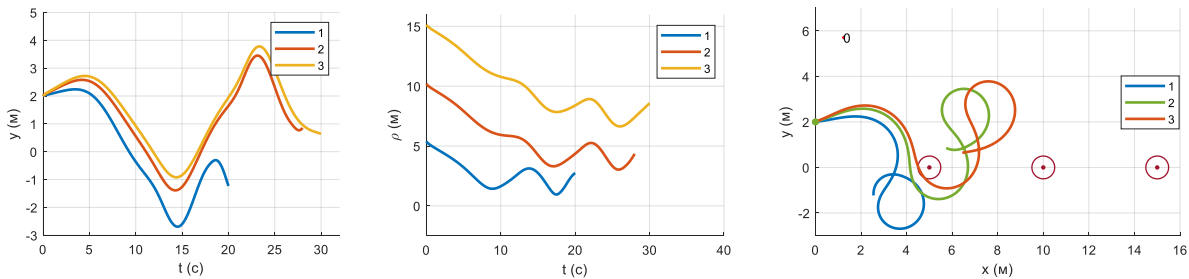


Рис. 4. Зависимости ошибки по y , дальности до цели от времени и траектории движения АПА

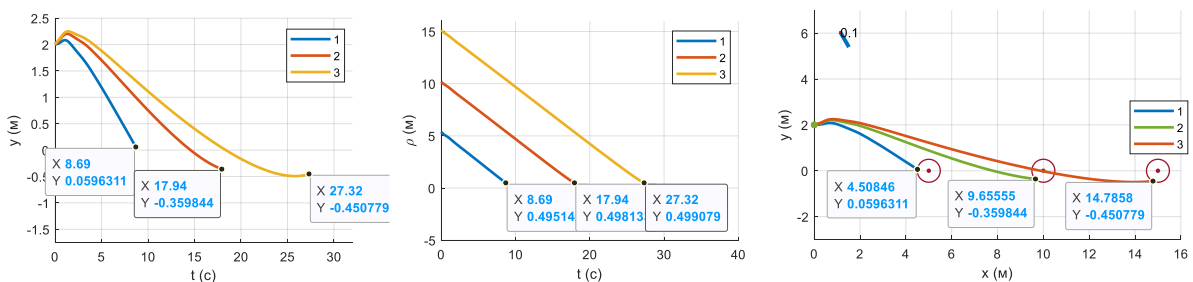


Рис. 5. Зависимости ошибки по y , дальности до цели от времени и траектории движения АПА

3. Формализация задачи и условия устойчивости

Мы будем предполагать, что $u_d \gg v_r, u_d \gg u_c$. В этом случае, следующие упрощения могут быть использованы:

1) Относительная дистанция между АПА и целью убывает по равномерному закону и определяется выражением $\rho_t = \rho_0 - u_d t = u_d \tau$, где $\tau = t_f - t$.

Для второго возможного типа поведения, показанного на рис. 4, также предполагается, что $u_c = 0, v_c = 0$. Однако видно, что с увеличением ρ_0 ошибка по y растёт.

И наконец, третий случай (рис. 5) показывает возможное поведение ρ и y при действии возмущений. Видно, что при увеличении ρ_0 амплитуда ошибки растёт (траектории как бы разбухают), но при этом ПА попадает в окрестность цели.

Приведенные соображения, могут быть интерпретированы как асимптотическая устойчивость системы в первом случае, во втором случае – неустойчивость, в третьем – устойчивость при постоянно действующих возмущениях. Формальное определение понятия устойчивости для рассматриваемой системы будет приведено далее.

Требуется найти условия, при которых может наблюдаться каждый из описанных типов поведения системы.

2) Время наведения АПА определяется выражением $t_f = \rho_0 / u_d$.

С учетом сделанных предположений, замкнутая система уравнений, описывающая движение АПА может быть представлена в виде

$$\dot{\beta} = r + \frac{q + u_d + u_c}{u_d \tau} s \beta + \frac{v_r + v_c}{u_d \tau} c \beta, \quad (6a)$$

$$\dot{q} = (a_u + b_u k_{pu})q + b_u k_{lu} p + F_u(v_r, r), \quad (6б)$$

$$\begin{aligned} \dot{v}_r = & a_v v_r + (a_{vr} + c_3 u_d) r + b_v k_{\psi} \beta \\ & + F_v(q, v_r, r), \end{aligned} \quad (6в)$$

$$\begin{aligned} \dot{r} = & (a_r + c_5 u_d) r + (a_{rv} + c_6 u_d) v_r \\ & + b_r k_{\psi} \beta + F_r(q, v_r, r), \end{aligned} \quad (6г)$$

$$\dot{p} = q, \quad p(0) = a_u u_d, \quad (6д)$$

где $q = u_r - u_d$,

$$F_u(v_r, r) = c_1 v_r r + c_2 r^2,$$

$$F_v(q, v_r, r) = qr + c_4 q v_r,$$

Параметры и выражения для функций, входящих в правые части этой системы, определяются из (2) и (5).

Система (6) должна быть дополнена уравнением для курсового угла

$$\dot{\psi} = r. \quad (7)$$

и выражениями для проекций на оси связанной системы координат скоростей течений, зависящих от него

$$u_c = V_c c (\beta_c - \psi), \quad v_c = V_c s (\beta_c - \psi). \quad (8)$$

При анализе устойчивости будет удобно рассматривать обобщенную систему уравнений, заданную в векторно-матричной форме

$$\dot{\xi} = \chi z + \frac{1}{\tau} (\xi + cz) + \frac{1}{\tau} F_1(\xi, z) + \frac{1}{\tau} R(\xi, z), \quad (9a)$$

$$\dot{z} = b \xi + Az + F_2(z), \quad (9б)$$

где ξ – скалярная функция, $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)^T$, A – постоянная $n \times n$ матрица, χ^T, c^T, b – постоянные $n \times 1$ векторы, компоненты $F_1(\xi, z)$ разлагаются в области $|\xi| + \|z\| \leq H$ в ряды по степеням $\xi, z_1, z_2, \dots, z_n$, начинающиеся членами не ниже второго порядка, $F_2(z) = (F_{21}(z), F_{22}(z), \dots, F_{2n}(z))^T$, компоненты $F_{2i}(z), i = 1, 2, \dots, n$ разлагаются в области $\|z\| \leq H$ в ряды по степеням z_1, z_2, \dots, z_n , начинающиеся членами не ниже второго порядка, $|R(\xi, z)| \leq \delta_1$.

Система уравнений (6) является частным случаем (9) при

$$\xi = \beta, \quad z = (q, v_r, r, p)^T, \quad \chi = (0, 0, 0, 1), \quad c = (0, 1/u_d, 0, 0),$$

$$b = (b_v k_{\psi}, 0, 0, 0)^T,$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & a_u + b_u k_{pu} & 0 & b_u k_{lu} \\ b_v k_{\psi} & 0 & a_v & a_{vr} + c_3 u_d \\ b_r k_{\psi} & 0 & a_{rv} + c_6 u_d & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$F_2 = (F_u, F_v, F_r)^T,$$

$$F_1 = (s\beta - 1) / u_d, \quad R = \frac{u_c}{u_d} (s\beta + c\beta).$$

Проекции скоростей течений интерпретируются как неконтролируемые внешние возмущения, входящие в описание $R_{\beta}(\psi, u_c, v_c)$.

Система (9) представляет собой нелинейную нестационарную систему с особой точкой при $t = t_f$, правые части которой $F_1(\xi, z), F_2(z)$ разлагаются в степенные ряды в окрестности точки $\xi = 0, z = 0$, начинающиеся членами не ниже второго порядка.

Формализуем, приведенные в предыдущем разделе типы поведения системы управления АПА в виде следующих определений устойчивости решений (9).

Наряду с системой (9) рассмотрим систему уравнений, в которой отсутствует неконтролируемое внешнее возмущение $R(\xi, z)$

$$\dot{\xi} = \chi z + \frac{1}{\tau} (\xi + cz) + \frac{1}{\tau} F_1(\xi, z), \quad (10a)$$

$$\dot{z} = b \xi + Az + F_2(z). \quad (10b)$$

Определение 1. Тривиальное решение системы (10) будем называть устойчивым, если для любого $\varepsilon > 0$ существует такое $\delta(\varepsilon) > 0$, что неравенство $\|x(0)\| < \delta(\varepsilon)$ влечет выполнение условия $\|x(t)\| < \varepsilon$ при $t \in [0, t_f - T_1]$ и любым $t_f > T_1$, где T_1 – произвольное фиксированное число.

Определение 2. Тривиальное решение системы (10) будем называть асимптотически устойчивым, если оно устойчиво и величина $\delta(\varepsilon)$ может быть выбрана для произвольного $\varepsilon > 0$ так, что

$$\lim_{\rho_0 \rightarrow \infty} \|x(t)\| = 0$$

при $t \in \Gamma: T_1 \leq t_f - t \leq T_2, t_f \rightarrow \infty$, где T_1, T_2 – произвольные фиксированные числа.

Определение 3. Тривиальное решение системы (10) будем называть неустойчивым, если для некоторого $\varepsilon > 0$ и любого $\delta > 0$ существует такое t^* , что $\|x(0)\| < \delta$ и $\|x(t^*)\| > \varepsilon$.

Определение 4. Тривиальное решение системы (10) будем называть устойчивым при постоянно действующих возмущениях, если для любого $\varepsilon > 0$ существует такое $\delta(\varepsilon) > 0$, что любое решение системы (9) для которого $\|x(0)\| < \delta(\varepsilon)$ и любым, $R(\xi, z)$ удовлетворяющем условию $|R(\xi, z)| < \delta(\varepsilon)$

влечёт $\|x(t)\| < \varepsilon$ при $t \in (0, t_f - T_1]$ и любом $t_f > T_1$, где T_1 – произвольное фиксированное число.

Пренебрегая членами второго порядка малости в (9), (10), получим нестационарную линейную систему первого приближения с особой точкой при $t = t_f$,

$$\dot{\xi} = \chi z + \frac{1}{\tau}(\xi + cz), \quad (11a)$$

$$\dot{z} = b\xi + Az. \quad (11b)$$

Нас будут интересовать условия, при выполнении которых из ее устойчивости или неустойчивости следует соответственно устойчивость или неустойчивость тривиального решения системы (10).

Случаи, возникающие при решении этой задачи, можно подразделить на не критические, когда задача решается первым стационарным приближением

$$\dot{x} = \tilde{A}x, \quad (12)$$

где

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} 0 & \chi \\ b & A \end{pmatrix}$$

и критические, когда рассмотрение линейного стационарного приближения недостаточно. В этой работе мы ограничимся рассмотрением, только не критического случая.

Перейдём непосредственно к анализу устойчивости нулевого решения системы (10).

Пусть в (10) все собственные числа матрицы линейной стационарной части \tilde{A} имеют отрицательные действительные части.

Покажем, что для любого $\varepsilon > 0$, существует такое $\delta(\varepsilon) > 0$ что $\|x\| \leq \varepsilon$ при $0 \leq t \leq t_f - T_1$ и $t_f > T_1$, если $\|x_0\| \leq \delta(\varepsilon)$. Предположим, что это не так. Тогда найдётся такое t^* , что $x(t^*) = \varepsilon$.

Введём функцию $V = x^T Hx$, где $x = (\xi, x^T)^T$, матрица $H > 0$ определяется из уравнения Ляпунова [10]

$$\tilde{A}^T H + H\tilde{A} = -G, \quad G > 0.$$

Производная от V в силу системы (10) может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} -\dot{V} &= x^T Gx - \frac{\partial V}{\partial x} \begin{pmatrix} \frac{1}{\tau}(\xi + cz) + \frac{1}{\tau}F_1(\xi, z) \\ F_2(z) \end{pmatrix} = \\ &= x^T x + W_1 + W_2 - q\left(\frac{1}{\tau}\tilde{c}z\right)^2, \end{aligned}$$

где

$$W_1 = x^T x - 2(1,0)Hx \frac{1}{\tau}\tilde{c}z + q\left(\frac{1}{\tau}\tilde{c}z\right)^2, \quad (13)$$

$$W_2 = x^T x - \frac{\partial V}{\partial x} \begin{pmatrix} \frac{1}{\tau}F_1(\xi, z) \\ F_2(z) \end{pmatrix}, \quad (14)$$

$\tilde{c} = (1,0)$, $G = 3I$, q – положительный параметр.

Рассмотрим функцию W_1 как квадратичную форму переменных x и $\frac{1}{\tau}\tilde{c}z$. Для того, чтобы W_1 была положительно определенной необходимо и достаточно выполнения неравенства

$$q > (1,0)H^2(1,0)^2. \quad (15)$$

Так как $F_1(\xi, z)$, $F_2(z)$ аналитические функции в окрестности нуля, разложения которых начинаются с членов второго порядка малости, то для любого $\eta > 0$, $0 \leq t \leq t_f - T_1$ в некоторой окрестности нуля справедливы оценки.

$$\left| \frac{\partial V}{\partial x} \begin{pmatrix} \frac{1}{\tau}F_1(\xi, z) \\ F_2(z) \end{pmatrix} \right| \leq \eta \|x\|^2, \quad (16)$$

$$W_2 \geq (1-\eta)\|x\|^2 > 0, \quad \text{при } x \neq 0. \quad (17)$$

Пусть q и η выбраны таким образом, что выполняются неравенства (15), (17). Тогда используя оценки

$$\lambda_1 \|x\|^2 \leq V \leq \lambda_2 \|x\|^2, \quad (18)$$

где λ_1 , λ_2 – минимальное и максимальное, соответственно, собственные числа матрицы H , получаем

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -x^T x - q\left(\frac{1}{\tau}\tilde{c}z\right)^2 \leq \\ &\leq (-\alpha_1 + \alpha_2 \frac{1}{\tau^2})V, \end{aligned}$$

где α_1 , α_2 – положительные постоянные.

Интегрируя это неравенство, находим

$$\|x\| \leq \alpha_0 \|x_0\| e^{-\alpha t}, \quad (19)$$

где α_1 , α_2 – положительные постоянные. Из (19) следует, что $\|x\| \leq \alpha_0 \|x_0\|$. Выбор δ из условия $\alpha_0 \|x_0\| < \varepsilon$ приводит к неравенству $\|x\| \leq \varepsilon$, которое будет выполняться для любых $0 \leq t \leq t_f - T_1$, $t_f > T_1$.

Пусть матрица \tilde{A} имеет хотя бы одно собственное число с положительной действительной частью. Тогда существует квадратичная форма $V(x)$, определяемая уравнением [10]

$$\dot{V} = \alpha V + x^T x,$$

не будет знакоотрицательной функцией, где α – положительная постоянная. Производная \dot{V} в этом выражении вычислена в силу системы (12). Вычисляя от этой функции производную в силу системы (10), получим

$$\dot{V} = \alpha V + W, \quad (20)$$

где

$$W = x^T x + \frac{\partial V}{\partial x} \begin{pmatrix} \frac{1}{\tau} F_1(\xi, z) \\ F_2(z) \end{pmatrix} + \frac{\partial V}{\partial x} \begin{pmatrix} \frac{1}{\tau} (\xi + cz) \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Используя (17), устанавливаем, что в некоторой окрестности нуля

$$W \geq (1 - \frac{\alpha_1}{\tau} - \eta) x^T x,$$

где α_1 – положительная постоянная. Откуда следует, что при

$$0 \leq t \leq t_f - \frac{\alpha_1}{\varepsilon}, \quad t_f > \frac{\alpha_1}{1 - \varepsilon}$$

$W \geq 0$. Тогда, из (20) находим $\dot{V} \geq \alpha V$. Интегрируя это неравенство с начальным условием $V_0 = V(x_0) > 0$, получим $V(x) \geq V_0 e^{\alpha t}$. Т.е. функция $V(x)$ растёт неограниченно и при достаточно большом t_f точка x выйдет за пределы области $\{x : \|x\| \leq \varepsilon\}$.

Пусть \tilde{A} матрица Гурвица. Покажем, что для любого $\varepsilon > 0$, существует такое $\delta(\varepsilon) > 0$ что $\|x\| \leq \varepsilon$ при $0 \leq t \leq t_f - T_1$ и $t_f > T_1$, если $\|x_0\| \leq \delta(\varepsilon)$, $\|R(\xi, z)\| \leq \delta(\varepsilon)$. Предположим, что это не так. Тогда найдётся такое t^* , что $x(t^*) = \varepsilon$.

Введём функцию $V = x^T H x$, где матрица $H > 0$ определяется из уравнения Ляпунова. Производная в силу системы (9) может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} -\dot{V} &= x^T G x - \frac{\partial V}{\partial x} \begin{pmatrix} \frac{1}{\tau} (\xi + cz) + \frac{1}{\tau} F_1(\xi, z) + R(\xi, z) \\ F_2(z) \end{pmatrix} = \\ &= x^T x + W_1 + W_2 - q \left(\frac{1}{\tau} \tilde{c} z \right)^2 - \frac{\partial V}{\partial x} \begin{pmatrix} R(\xi, z) \\ 0 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

где W_1, W_2 определены выражениями (13), (14). Откуда, при выполнении условий (15), (17) находим

$$\dot{V} \leq (-\alpha_1 + \alpha_2 \frac{1}{\tau^2}) V + 2x^T H \begin{pmatrix} R(\xi, z) \\ 0 \end{pmatrix},$$

где α_1, α_2 – положительные постоянные.

Положим $\rho = V^{1/2}$. Тогда

$$\begin{aligned} \dot{\rho} &= V^{-1/2} \dot{V} / 2 \leq \\ &\leq V^{-1/2} (-\alpha_1 + \alpha_2 \frac{1}{\tau^2}) V / 2 + \alpha_3 V^{-1/2} \|R(\xi, z)\| \|x\| = \\ &= (-\alpha_1 + \alpha_2 \frac{1}{\tau^2}) \rho / 2 + \frac{\alpha_3 \|R(\xi, z)\| \|x\|}{\rho}, \end{aligned}$$

где α_3 – положительная постоянная.

Так как $\|x\| \rho^{-1/2} \leq \lambda_1^{-1/2}$, где

λ_1 – минимальное собственное число матрицы H , то

$$\dot{\rho} \leq (-\alpha_1 + \alpha_2 \frac{1}{\tau^2}) \rho / 2 + a(t),$$

где $a(t) = \alpha_3 \lambda_1^{-1/2} \|R(\xi, z)\|$. Интегрируя это неравенство, получаем оценку

$$\|x\| \leq \alpha_0 \|x_0\| + \alpha_4 \delta(\varepsilon),$$

где α_4 – положительная постоянная. Выбор δ , обеспечивающего выполнение условий $\alpha_0 \|x_0\| < \varepsilon / 2$, $\alpha_4 \delta(\varepsilon) < \varepsilon / 2$ приводит к неравенству $\|x\| \leq \varepsilon$, которое будет выполняться для любых $0 \leq t \leq t_f - T_1, t_f - T$.

Таким образом, доказано следующее утверждение.

Теорема. 1. Если все собственные числа матрицы \tilde{A} имеют отрицательные действительные части, то нулевое решение системы (10) асимптотически устойчиво с оценкой (19) и кроме того оно устойчиво при постоянно действующих возмущениях в системе (9).

2. Если среди собственных чисел матрицы \tilde{A} имеется хотя бы одно с положительной действительной частью, то нулевое решение (9) неустойчиво.

4. Компьютерное моделирование

Для иллюстрации предложенного подхода, в статье, использовалась модель АПА торпедообразного типа [7]. Параметры модели и управлений приведены в табл. 1.

Прежде всего, мы показываем, что выбор навигационного параметра k_{ψ} в (3) может приводить как к устойчивости, так и неустойчивости замкнутой системы. Действительно, при $k_{\psi} \leq 45$ матрица \tilde{A} имеет одно комплексное собственное число с положительной действительной частью, а при $k_{\psi} > 45$ матрица \tilde{A} Гурвица. На рис. 3 показано поведение устойчивой системы при $k_{\psi} = 50$, а на рис. 4 – неустойчивой при $k_{\psi} = 8$. Рис. 5 иллюстрирует поведение при $k_{\psi} = 50$ устойчивой системы в присутствии течения.

На рис. 6 показаны траектории движения АПА для различных начальных условий и начальных дальностей 5м, 10м, 15м, зависимости компонент

состояния системы (1), (2), ρ , β и амплитуд управлений (3), (4) от времени при $k_{\psi} = 150$ в присутствии течения.

Отметим следующее.

1. Во всех рассмотренных случаях АПА попадает в окрестность цели – круг радиус которого не превышает 0.5 м.

2. По мере приближения к цели, амплитуды значений компонент состояния и управляющих воздействий растут. Мы объясняем это действием течения на АПА. Для уменьшения этого эффекта закон управления может корректироваться введением дополнительных составляющих частично компенсирующих влияние течений, используя, например, подходы, предложенные в [6, 7].

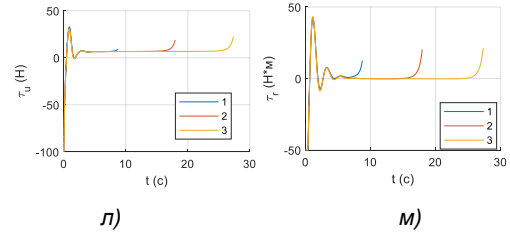
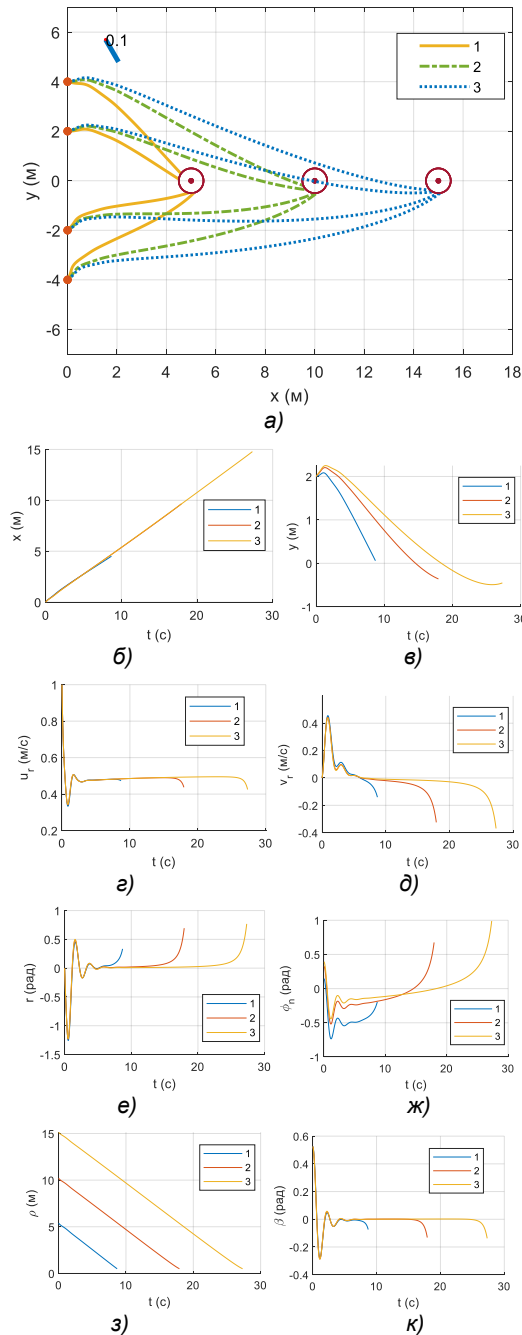


Рис. 6 - Зависимости компонент состояния и управлений АПА: а) траектория движения, б), в), г), д), е), ж) компонент состояния, з) расстояния до цели, к) угла обзора и л), м) элементов управления от времени, где: 1 – 5 м, 2 – 10 м и 3 – 15 м дальности до объекта

На рис.7 показаны зависимости минимального значения λ действительных частей собственных чисел матрицы \tilde{A} от k_{ψ} для трех продольных скоростей: 1–0.5, 2–1.0, 3–1.5 м/с, позволяющие выбрать его значение из условия устойчивости. Видно, что при увеличении величины желаемой продольной скорости необходимо одновременно увеличивать k_{ψ}

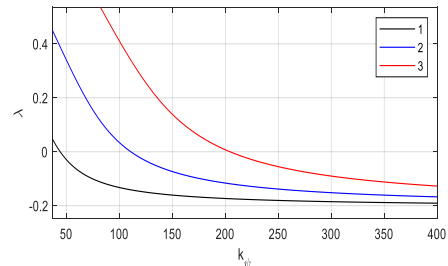


Рис 7. Зависимости минимального значения действительных частей собственных чисел матрицы \tilde{A} от k_{ψ}

Таблица 1

Модель АПА	$m_{11} = 47.5, m_{22} = 94.1,$ $m_{33} = 13.6, m_{23} = 5.2, m_{32} = 5.2$
Регулятор	$k_{ru} = 200,$ $k_{rv} = 20,$ $k_{\psi} = 150$ $u_d = 0.5$ м/с
Начальные условия	$x_0 = 0$ м, $y_0 = 2$ м, $x_f = [5, 10, 15]$ м, $y_f = 0,$ $\beta_0 = \pi/6 = 0.524$ рад = $30^\circ,$ $\psi_0 = 0.656$ рад = $37.6^\circ,$ $u_{r0} = 1$ м/с, $v_{r0} = 0$ м/с,
Течение	$V_c = 0.1$ м/с, $\beta_c = -\pi/3$ рад

Заключение

Рассмотрена задача управления сближением АПА с заданным объектом по оценке угла визирования с помощью изображений поступающих с видеокamеры или гидроакустического датчика. Предложенный в работе подход, позволяет выбрать на этапе проектирования опытного образца параметры модели АПА и системы управления,

обеспечивающих стремление к нулю ошибки начального позиционирования и ее ограниченности при действии неконтролируемого подводного течения с увеличением интервала управления. Результаты компьютерного моделирования показали, что при выборе параметров замкнутой системы из условий устойчивости, во всех рассмотренных случаях, АПА попадал в окрестность

цели. Закон управления может корректироваться введением дополнительных составляющих частично компенсирующих влияние течения, используя методы теории фильтрации. Отметим, что аналогичным образом может решаться задача повышения точности системы управления с учетом ошибок измерений видеокамеры и гидроакустического датчика.

Литература

1. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Костенко В.В., Павин А.М. Модели, системы и технологии подводных роботов и их применение для решения поисково-обследовательских задач. Тр. XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019, Москва. 2019.—С.3271-3278.
2. Bellingham J., "Autonomous underwater vehicle docking," Springer Handbook of Ocean Engineering, Cham: Springer International Publishing, pp. 387–406, 2016.
3. Li B., Xu Y., Liu Ch., Sh. Fan, Xu W. "Terminal navigation and control for docking an underactuated autonomous underwater vehicle, IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation Control and Intelligent Systems, pp. 25-30, 2015.
4. Maki T, Shiroku R., Sato S., Matsuda T., Sakamaki T., and Ura T., Docking method for hovering type AUVs by acoustic and visual positioning, In: 2013 IEEE International Underwater Technology Symposium (UT), Tokyo, Japan, 5–8 March, pp. 1–6, 2013.
5. Burdinsky N. Guidance algorithm for an autonomous unmanned underwater vehicle to a given target. Optoelectronics Instrumentation and Data Processing vol. 48, no. 1, pp. 69-74, 2012.
6. Agular A.P., Pascoal A.M. Dynamic positioning and way-point tracking of underactuated AUVs in the presence of ocean currents, International Journal of Control. 80(7): 1092-1108, 2007.
7. Zaopeng D., Wan L., Wan L., Li Y. Point Stabilization for an Underactuated AUV in the Presence of Ocean Currents, July International Journal of Advanced Robotic Systems 12(7):1, 2015.
8. Fossen T. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, John Wiley & Sons, 2011.
9. Барабанов А.Т. Теория линейных нестационарных систем с особой точкой. Устойчивость систем, Автоматика и телемеханика, 6, pp. 5–16, 1969.
10. Малкин И.Г. Теория устойчивости, М.—Л., Гостехиздат, 1952, 431 стр.

References

1. Kiselev L.V., Inzarcev A.V., Kostenko V.V., Pavin A.M. Modeli, sistemy i tekhnologii podvodnyh robotov i ih primeneniye dlya resheniya poiskovo-obsledovatel'skih zadach [Models, systems and technologies of underwater robots and their application for solving search and survey tasks]. Tr. XIII Vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya VSPU-2019, Moskva. 2019.—S.3271-3278. (in Russian)
2. Bellingham J., "Autonomous underwater vehicle docking," Springer Handbook of Ocean Engineering, Cham: Springer International Publishing, pp. 387–406, 2016.
3. Li B., Xu Y., Liu Ch., Sh. Fan, Xu W. "Terminal navigation and control for docking an underactuated autonomous underwater vehicle, IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation Control and Intelligent Systems, pp. 25-30, 2015.
4. Maki T, Shiroku R., Sato S., Matsuda T., Sakamaki T., and Ura T., Docking method for hovering type AUVs by acoustic and visual positioning, In: 2013 IEEE International Underwater Technology Symposium (UT), Tokyo, Japan, 5–8 March, pp. 1–6, 2013.
5. Burdinsky N. Guidance algorithm for an autonomous unmanned underwater vehicle to a given target. Optoelectronics Instrumentation and Data Processing vol. 48, no. 1, pp. 69-74, 2012.
6. Agular A.P., Pascoal A.M. Dynamic positioning and way-point tracking of underactuated AUVs in the presence of ocean currents, International Journal of Control. 80(7): 1092-1108, 2007.
7. Zaopeng D., Wan L., Wan L., Li Y. Point Stabilization for an Underactuated AUV in the Presence of Ocean Currents, July International Journal of Advanced Robotic Systems 12(7):1, 2015.
8. Fossen T. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, John Wiley & Sons, 2011.
9. Barabanov A.T. Teoriya linejnyh nestacionarnykh sistem s osoboj tochkoj. Ustojchivost' sistem [Theory of linear nonstationary systems with a singular point]. System stability, Avtomatika i telemekhanika, 6, pp. 5–16, 1969. (in Russian)
10. Malkin I.G. Teoriya ustojchivosti [Stability theory], M.—L., Gostekhizdat, 1952, 431 str. (in Russian)

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Борис Аркадьевич Скороход, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информатики и управления в технических системах, Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33 Университетская ул., 33, e-mail: boris.skorohod@mail.ru

Boris A. Skorohod, Dr. Sci. (Eng), professor, professor of the Department of informatics and control in technical systems, Sevastopol State University, 299053, Sevastopol, Universitetskaya str., 33 Universitetskaya str., 33, e-mail: boris.skorohod@mail.ru

Павел Владимирович Жиляков, аспирант, кафедры информатики и управления в технических системах, Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33 Университетская ул., 33, e-mail: yany_@mail.ru

Pavel V. Zhilyakov, postgraduate student, Department of informatics and control in technical systems, Sevastopol State University, 299053, Sevastopol, Universitetskaya str., 33 Universitetskaya str., 33, e-mail: yany_@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.03.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 06.06.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 22.06.2022.

Научная статья

УДК 621.396.932

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.009>

Перспективы применения цифровых систем связи IoT в системе управления движением судов

А.Е. Фатеев¹ artyomftv@gmail.com, И.С. Скварник¹ wbhm@yandex.ru

¹Дальневосточный федеральный университет

Аннотация. Системы управления движением судов (СУДС) оказывают большое влияние на безопасность и эффективность функционирования морского транспорта. Их важнейшим составным элементом является телекоммуникационная инфраструктура, обеспечивающая обмен данными между всеми участниками процесса мореплавания. На сегодняшний день в ее основе находятся устаревшие аналоговые технологии связи, которые тормозят развитие отечественной морской отрасли.

Перспективным решением данной проблемы является применение технологии интернета вещей (IoT) в телекоммуникационной инфраструктуре системы управления движением судов. Данная технология находит широкое применение в различных областях мировой промышленности и экономики. Благодаря преимуществам, связанным со стоимостью, автономностью и энергоэффективностью, IoT-устройства способны обеспечить решение ряда существующих проблем.

В работе предложена новая телекоммуникационная инфраструктура СУДС Владивосток, на основе использования технологии LPWAN-сетей. Определены основные ее параметры, а также произведен расчет зоны ее покрытия на основе модели Лонгли-Райса. По результатам расчетов сделан вывод об эффективности применения технологии IoT для совершенствования телекоммуникационной инфраструктуры СУДС.

Ключевые слова: интернет вещей, морской транспорт, система управления движения судов, LPWAN, цифровые системы связи.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FZNS-2023-0008.

Для цитирования: Фатеев А.Е., Скварник И.С. Перспективы применения цифровых систем связи IoT в системе управления движения судов, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 79—88. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.009

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.009>

Prospects for the application of digital communication systems iot in ship traffic control systems

Artyom E. Fateev¹ artyomftv@gmail.com, Igor S. Skvarnik¹ wbhm@yandex.ru

¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. Vessel traffic management systems (VTMS) have a major impact on the safety and efficiency of maritime transport. Their most important component is the telecommunications infrastructure, which ensures the exchange of data between all participants in the navigation process. Today, it is based on outdated analog communication technologies that hinder the development of the domestic maritime industry.

A promising solution to this problem is the use of the Internet of Things (IoT) technology in the telecommunications infrastructure of the vessel traffic management systems. This technology is widely used in various areas of the global industry and economy. With the advantages of cost, autonomy and energy efficiency, IoT-devices can provide a solution to a number of existing problems.

The paper proposes a new telecommunications infrastructure for the VTMS Vladivostok, based on the use of LPWAN-network technology. Its main parameters are determined, and its coverage area is calculated based on the Longley-Rice model. Based on the results of the calculations, a conclusion was made about the effectiveness of the use of IoT technology to improve the telecommunications infrastructure of the VTMS.

Key words: Internet of Things, maritime transport, vessel traffic management system, LPWAN, digital communication systems.

Financial Support: The work was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FZNS-2023-0008.

For citation: Artyom E. Fateev, Igor S. Skvarnik, Prospects for the application of IoT digital communication systems in the vessel traffic management system, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 1, P. 79—88. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.009

Введение

Перспективы развития судоходства в РФ определяются её расположением на берегах трёх океанов и внушительной протяженностью морской

границы. Кроме этого, Россия занимает второе место в мире по длине внутренних водных путей (ВВП), превышающей 100 000 км [6]. Это повышает значимость России как мирового лидера в освоении водных транспортных путей и предоставляет

возможности для расширения международного сотрудничества и торговли.

В современных условиях в целях повышения эффективности и конкурентоспособности отечественной морской отрасли, особую значимость приобретает активное внедрение в систему обеспечения безопасности мореплавания современных цифровых технологий и искусственного интеллекта.

Важнейшим элементом, обеспечивающим безопасность и эффективность функционирования морской отрасли в РФ, является система управления движением судов (СУДС). Её работа строится на непрерывном сборе информации о надводной обстановке от различных источников и обмене данными между береговыми службами и судами в море. Однако, на современном этапе, в основе телекоммуникационной инфраструктуры СУДС лежат аналоговые технологии передачи данных (ПД), которые снижают эффективность функционирования СУДС по критерию результат/стоимость.

Необходимость повышения эффективности работы СУДС в целях обеспечения безопасности мореплавания обуславливает актуальность поиска и внедрения современных технологий передачи данных.

Вариантом решения существующей проблемы является применение технологии интернета вещей (Internet of Things, IoT). Данная технология широко используется в различных отраслях экономики и имеет значительные перспективы в совершенствовании инфраструктуры СУДС.

1. Недостатки действующей телекоммуникационной инфраструктуры СУДС

СУДС представляет собой комплекс территориально разнесённых стационарных объектов, взаимодействующих между собой и судами за счёт телекоммуникационной сети связи и передачи данных [1]. Основная задача СУДС заключается в осуществлении информационного обеспечения морских судов, береговых служб и центров управления в целях принятия управленческих решений и предотвращения ошибок в судовождении [3].

Согласно приказу № 395 от 12.11.2021 «Об утверждении общих правил плавания и стоянки судов в морских портах РФ и на подходах к ним» [13] при заходе или выходе из морского порта судно обязано передать на берег свой номер (присвоенный Международной морской организацией), название на русском языке и буквами латинского алфавита, позывной сигнал, а также другую информацию (37 пунктов в перечне необходимых данных для СУДС) в рамках автоматической информационной системы (АИС).

В настоящий момент данная система является единственным средством цифровой передачи данных с судов на берег и обратно. Экипажам зачастую приходится использовать общедоступную сеть сотовой связи для передачи данных, что не отвечает требованиям безопасности. При этом потребность в передаче больших объёмов

информации постоянно растёт и требует увеличения скорости передачи данных, что не может быть обеспечено действующими системами связи.

Несмотря на то, что аналоговые системы радиосвязи имеют широкое применение, им присущ ряд серьёзных недостатков - низкое качество звука, большие фоновые шумы и атмосферные помехи, нестабильное функционирование и другие. Также они не отвечают современным требованиям по надёжности, производительности, безопасности, гибкости управления и, тем самым, не могут обеспечить повышение уровня безопасности мореплавания [18, 19].

Кроме этого, для действующих средств передачи данных на суда обязательно наличие соответствующей инфраструктуры: технических зданий, антенно-мачтовых устройств, соответствующего электропитания, а также квалифицированного обслуживающего персонала. Обеспечение данных условий, при определённых обстоятельствах, не является экономически целесообразным, так как требует значительных временных и финансовых ресурсов. Также присутствует риск человеческого фактора, который зачастую является причиной нештатных или аварийных ситуаций.

Цифровые технологии гарантируют передачу всех необходимых данных за счёт коррекции ошибок, а алгоритмы программного обеспечения прекрасно отличают фоновый шум от полезного сигнала. В следствие этого цифровая беспроводная передача данных гарантирует такую же надёжную доставку информации, как и проводная система [28].

Таким образом, для информационного обеспечения СУДС возникает острая необходимость во внедрении цифровых методов передачи данных, обладающих полной автономностью и энергоэффективностью, не требующих значительных временных и финансовых инвестиций, способных обеспечить потребность в возрастающих объёмах передаваемой информации. Одним из направлений решения вышеописанных проблем является применение технологии IoT.

2. Практика применения технологии IoT в морской отрасли

Технология интернета вещей представляет собой технологию взаимодействия IoT-устройств, способных передавать, анализировать и обрабатывать данные, а также обмениваться ими без необходимости взаимодействия человека с человеком или человека с оборудованием [22].

Технологии передачи данных IoT можно разделить на две основные группы: сети с малым диапазоном охвата, к которым относятся Bluetooth, NFC, Wi-Fi, Z-Wave, Zigbee и другие, а также сети с широкой зоной охвата (Low-Power Wide-Area Network, LPWAN), в числе которых IoT 4G LTE, IoT 5G, Cat-0, Cat-1, LoRaWAN, LTE Cat-M1, NB-IoT (Cat-M2), Sigfox и другие (Рис. 1) [7].

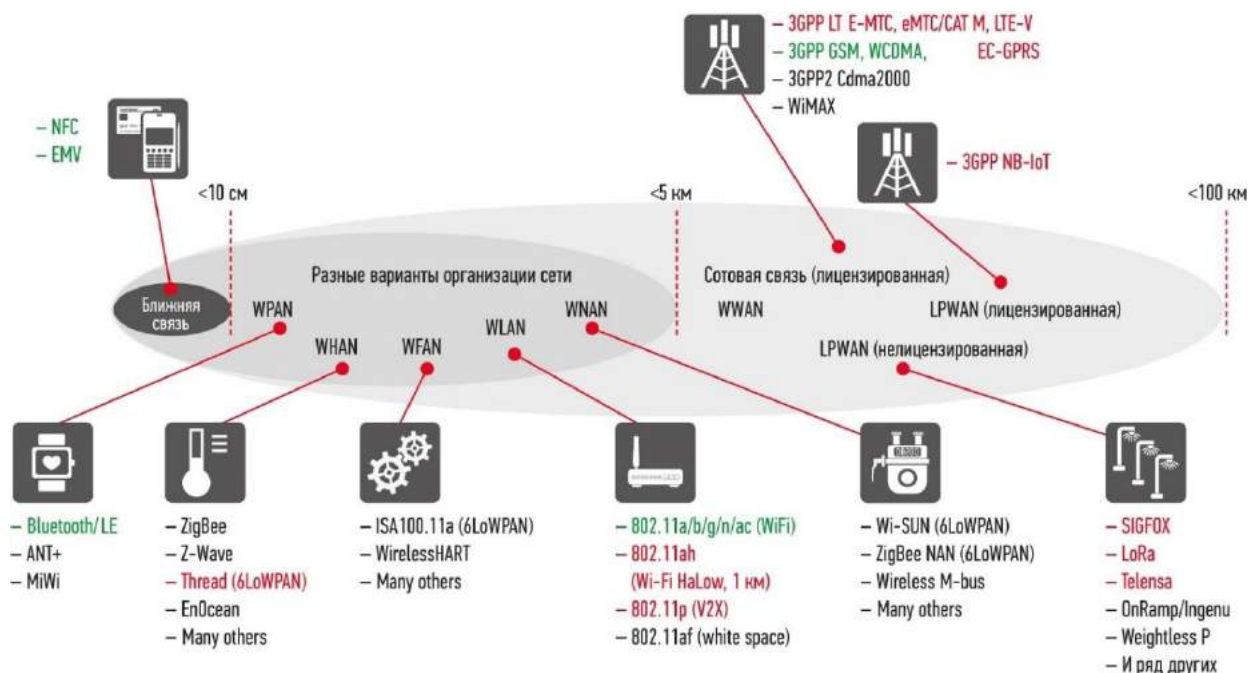


Рис. 1. Технологии передачи данных IoT

Для задач передачи небольших пакетов данных на значительные расстояния используются сети LPWAN, которые в последнее время все чаще используются в морской отрасли. Это подтверждается научными исследованиями [25, 27] и опытом использования стандарта LoRa для отслеживания траектории движения судов в прибрежной зоне. Использование данного стандарта нашло применение в целом ряде проектов, реализованных в морской отрасли.

Так, компания «Orange Business Services» подписала договор об использовании на судах ГК

«Доброфлот» IoT-устройств с целью контроля за расходом топлива и работой двигателей. Первым судном, оснащённым подобными устройствами, стал транспортный рефрижератор «Прогресс» [5], на котором сенсорами были оснащены главный двигатель и вспомогательный дизель-генератор. Используемые IoT-устройства посредством спутникового канала связи позволяют контролировать расход топлива и работу двигателей в режиме реального времени (рис. 2).



Рис. 2. Архитектура сети в условиях открытого океана

5 июня 2020 года компания «ABB» подписала контракт на оснащение IoT-устройствами газовоза ледового класса «Кристоф де Маржери», выполняющего доставку СПГ в Китай [9]. Судно будет получать круглосуточную дистанционную поддержку

от глобальной сети центров совместного управления, которая повысит безопасность и эффективность его работы, а в случае возникновения неисправности оперативно обнаружит её и поможет устранить.

Паромная компания «Vasto» использует на базе IoT-устройств программное обеспечение Route Exchange (REX) [23], позволяющее предотвращать потенциальные столкновения судов. Данное ПО работает по принципу общей интерактивной карты, на которой отображается информация с судовых датчиков, передаваемая с помощью спутниковых каналов связи.

В ноябре 2022 года компания «Vodafone» заключила соглашение с Дунайским пароходством о внедрении сети NB-IoT [20]. Данная технология будет использоваться для мониторинга траектории движения судов, отслеживания груза, обеспечения объектов надёжной связью за счет спутниковых каналов передачи данных.

Интеллектуальные датчики компании «DigiSeas» с поддержкой технологии IoT [24] обеспечивают качественное круглосуточное наблюдение, мгновенные оповещения и, в случае любых нарушений безопасности, позволяют сформировать подробные журналы аварий.

Компания «ThinkPal» предлагает решения для мониторинга судов. Обратная связь и оповещения о параметрах двигателя и оборудования, погоде и многом другом в режиме реального времени помогают повысить эффективность работы и рационально использовать время.

Передовые сенсоры компании «Augury» позволяют проводить прогнозируемое техническое обслуживание. Беспроводные датчики собирают данные о вибрации, температуре и магнитных полях с целью диагностики состояния узлов и агрегатов. Безопасный облачный сервис сравнивает данные с записями аналогичного оборудования и предупреждает пользователя о любой возможной неисправности.

Компания «Sateliot» [21] предлагает решения для мониторинга морских судов с использованием стандарта NB-IoT и каналов спутниковой связи, обеспечивающей глобальное покрытие.

Также, в настоящее время широко обсуждается внедрение технологии интернета вещей для развития безэкипажного судовождения [26].

Таким образом, мировой опыт использования технологии IoT в судоходстве показывает её высокую эффективность при решении широкого круга задач. В силу полной автономности, высокой энергоэффективности, низкой стоимости оборудования и простоты организации сети, технология IoT имеет долгосрочную перспективу применения в СУДС.

3. Предложения по применению технологии IoT в СУДС

Передача информации с судовых систем в центры СУДС с использованием технологии IoT способна обеспечить принятие оперативных решений по вопросам судовождения, технического обслуживания и предотвращения экстренных ситуаций в море [12].

В данном случае передача данных возможна как с использованием спутниковых каналов связи, так и за счёт организации прямой передачи данных с судовых IoT-устройств на береговые базовые станции (БС), которые, принимая сигналы от всех датчиков в радиусе своего действия, обрабатывают

полученную информацию и передают её в центр управления СУДС (Рис. 3).

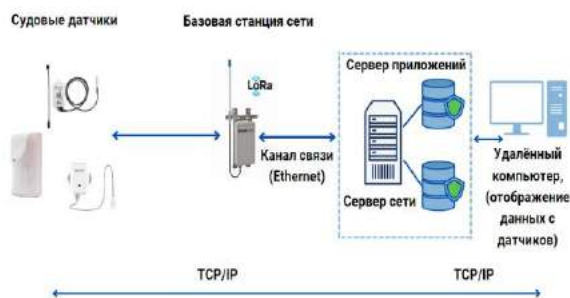


Рис. 3. Схема передачи данных с IoT-устройств

Внедрение интернета вещей в систему управления судовождением может сделать возможной организацию системы слежения за судами, определения их курса в зоне судоходства и автоматическую выдачу предупреждений для предотвращения столкновений судов в узких судоходных каналах и подходах к портам.

Центры управления СУДС за счёт использования моделей анализа данных, полученных от IoT-устройств, смогут обеспечить оперативное прогнозирование и предупреждение экипажей судов о потенциально опасных ситуациях.

Результатами применения технологии IoT в СУДС могут быть:

- организация новых (резервных) каналов передачи данных для связи с судами в прибрежной зоне;
- передача телеметрии с судна на берег;
- контроль за расходом топлива;
- мониторинг экологической обстановки;
- автоматизация документооборота с береговыми службами;
- сокращение числа обслуживающего персонала на судах и в береговых службах.

Таким образом, на основе применения технологии IoT и стандартов LPWAN-сетей возможно создание принципиально новой телекоммуникационной инфраструктуры для СУДС, которая повысит безопасность и эффективность мореплавания в целях дальнейшего развития морской отрасли.

4. Расчёт зоны покрытия LPWAN-сети

В сетях LPWAN используются такие технологии передачи данных как Sigfox, LoRa, NB-IoT и другие. Выбор соответствующей технологии зависит от требуемых параметров: дальности связи, скорости передачи данных, числа устройств в сети и финансовых затрат.

В данном разделе приведены результаты расчёта зоны покрытия LPWAN-сети для СУДС Владивосток [8] с использованием стандарта LoRa.

Выбор данного стандарта обусловлен высокой скоростью передачи данных, защищённостью каналов связи, отсутствием необходимости в получении операторской лицензии, малой стоимостью и доступностью устройств на российском рынке.

Для оценки линии связи по технологии LoRa произведем расчет основных параметров -

коэффициента SF, расчет потерь и расчет бюджета канала.

Технология LoRa использует различные способы расширения спектра сигнала, что отражает коэффициент SF (SF - Spreading Factors) [14]. Он определяет количество изменений частоты во времени, используемых для кодирования одного бита информации, что в конечном итоге влияет на соотношение сигнал/шум (SNR) и дальность передачи. Значение коэффициента SF может

варьироваться в пределах от 7 до 12, при этом 7 - самый быстрый и малый по дальности, а 12 - самый медленный и наиболее протяжённый. Более высокое значение SF способствует улучшению величины сигнала и дальности действия, а также приводит к увеличению времени нахождения в эфире и уменьшению количества пакетов.

В таблице 1 приведены параметры для различных значений коэффициентов SF [29].

Таблица 1

Характеристики линии связи при различных значениях коэффициента SF.

Спрэд-фактор (SF) при 125 кГц	Скорость передачи данных	Дальность связи при прямой видимости
SF7	5470 бит/с	3 км
SF8	3125 бит/с	5 км
SF9	1760 бит/с	8 км
SF10	980 бит/с	10 км
SF11	440 бит/с	15 км
SF12	290 бит/с	20 км

Для расчёта значения SF необходимо учесть следующие параметры: дальность радиолинии, требуемая скорость передачи данных, помехи в радиочастотном спектре и пропускная способность канала.

Значение SF вычисляется по следующему уравнению:

$$SF = \log_2(BW) + CR + 4 \quad (1),$$

где SF – коэффициент расширения спектра; BW (Bandwidth) – полоса пропускания канала передачи в Гц;

CR – скорость кодирования (4/5, 4/6, 4/7 или 4/8).

В случае передачи, использующей полосу пропускания 125 кГц и скорость кодирования 4/5, коэффициент распространения получится следующим:

$$SF = \log_2(125000) + \frac{4}{5} + 4 = 12 \quad (2).$$

Также немаловажной характеристикой при расчёте зоны покрытия и определении качества сети является бюджет канала связи. Данный показатель позволяет произвести оценку качества канала радиопередачи [10], определить насколько эффективно используются имеющиеся ресурсы и оценить возможность достижения требуемого уровня качества связи. В нашем случае расчёт бюджета канала связи производился с использованием значений потерь в свободном пространстве и мощности сигнала на входе в приёмник.

Использование показателя бюджета канала связи позволяет оптимизировать передачу данных путём правильной настройки параметров передатчика и приёмника, выбора оптимальной модуляции, использования усилителей сигнала и других методов для улучшения качества связи [4].

Ниже приведен расчёт для одного из стационарных объектов СУДС Владивосток – РТП Туманная со следующими характеристиками (Рис. 4).

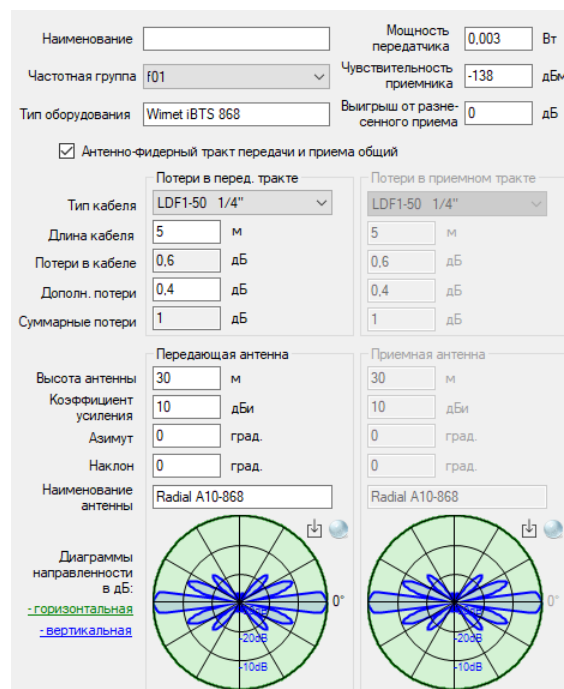


Рис. 4. Характеристики приёмника и передатчика на РТП Туманная

Расчёт потерь в свободном пространстве (L) произведён по следующей формуле:

$$L = 92,5 + 20 * \lg(f * d) \quad (3),$$

где f – частота в ГГц;

d – расстояние между приёмником и передатчиком в км.

$$L = 92,5 + 20 * \lg(0,868 * 20) = 117,2 \text{ дБ} \quad (4).$$

Далее представлен результат расчета мощности передаваемого сигнала (Pr) на входе приёмника. Для этого использовалась следующая формула:

$$Pr = Pt + Gt - Lc - L - Lc + Gr \quad (5),$$

где $Pt = -25.2$ дБ - мощность передатчика LoRa;
 $Gt = Gr = 10$ дБи - коэффициент усиления приёмной
 и передающей антенны базовой станции LoRa;
 $Lc = 1$ дБ значение затухания в кабеле.

$$Pr = -25.2 + 10 - 1 - 117.2 - 1 + 10 = -124,4 \text{ дБ} \quad (6).$$

На основе представленных выше результатов
 был получен бюджет канала связи Lm по следующей
 формуле:

$$Lm = Pr - Sr \quad (7),$$

где $Sr = -138$ дБ - чувствительность приёмника
 LoRa.

$$Lm = -124,4 - (-138) = 13,6 \text{ дБ} \quad (8).$$

По результатам проведенных расчётов было
 установлено, что мощность сигнала на входе
 приёмника превосходит чувствительность на 13,6 дБ,
 что говорит об уверенном приеме сигнала в
 предполагаемой зоне покрытия.

Расчёт зоны покрытия выполнен на основе
 модели распространения радиосигналов Лонгли-
 Райса, которая учитывает особенности местного
 рельефа и позволяет с высокой точностью оценить
 территориальный охват радиосети.

Результаты расчетов показывают, что
 полученная LPWAN-сеть СУДС Владивосток
 покрывает все основные прибрежные судовые пути
 на расстоянии 20 км от берега и обеспечивает
 передачу данных с постоянной скоростью 290 бит/с
 на все суда, находящиеся в акватории морских
 портов Посыет, Зарубино и Владивосток (Рис. 5).

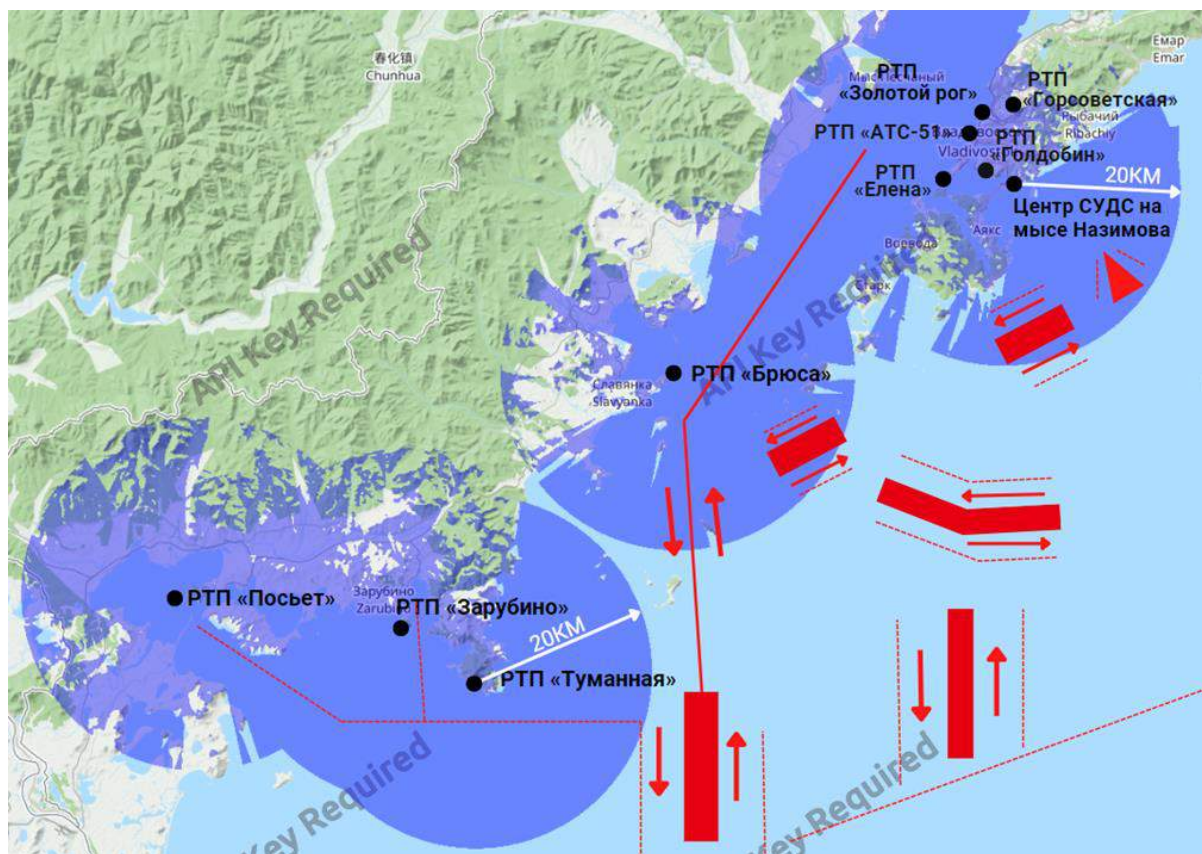


Рис. 5. Зона покрытия LPWAN-сети СУДС Владивосток

Заключение

Проведенное исследование показывает
 необходимость в развитии отечественной системы
 обеспечения безопасности мореплавания за счет
 внедрения цифровых технологий передачи и
 обработки информации для связи с судами в
 прибрежных зонах.

Результаты расчетов подтверждают способность
 LPWAN-сети обеспечить зону покрытия в
 прибрежной полосе для обмена информацией с
 судами.

Высокая энергоэффективность LPWAN-сетей и
 отсутствие лицензирования частот снижают
 себестоимость передаваемой информации и
 повышают эффективность функционирования СУДС.

Применение технологии LPWAN-сетей будет
 способствовать дальнейшему развитию концепции e-
 Navigation [15-17], а также таких технологий как
 «Морское облако» [2, 11] и безэкипажное
 судовождение, что повысит безопасность
 мореплавания и конкурентоспособность морской
 отрасли.

Литература

1. Б.В., Михневич. Взаимодействие оператора СУДС и судоводителя при проводке судна / Б.В. Афанасьев, А.В. Михневич Б.В // Транспортное дело России - 2018. – Номер 3 – С. 106–107. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35136137> (дата обращения: 24.11.2022)
2. Базаров Ю.И., Исмагилов М.И., Рогов А.Н. Новая морская цифровая связь для е-Навигации // Транспорт Российской Федерации. 2018. № 3(76). С. 48–54.
3. Бузенков, И. И., Родыгина И.В., Духнич Е.И., Щербаков А.И. Модель интеллектуальной системы визуализации технического состояния оборудования СУДС / И. И. Бузенков, И.В. Родыгина, Е.И. Духнич, А.И. Щербаков // Эксплуатация морского транспорта. ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова», – 2021. – № 4(101). – С. 194–196. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47346059> (дата обращения: 27.11.2022) – Текст: электронный.
4. В.А., Першина, Н.Д. Титова, М.С. Степанов. Построение автоматизированной системы сбора данных с приборов учёта на базе стандарта LoRaWAN /В.А. Першина, Н.Д. Титова, М.С. Степанов // Телекоммуникационные устройства и системы - 2019. – Номер 2 – С. 3–9. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42403690> (дата обращения: 01.07.2023)
5. В. Бахур. Интернет вещей от Orange Business Services поможет ГК «Доброфлот» сэкономить на горючем [Электронный ресурс] // Информационный портал С News URL: https://www.cnews.ru/news/line/2018-05-22_internet_veshchej_ot_orange_business_services_pomozhet (дата обращения: 28.11.2022).
6. Инфраструктура водного транспорта [Электронный ресурс] // Федеральное агентство морского и речного транспорта. URL: <https://morflot.gov.ru/glavnaya/intmap.html> (дата обращения: 07.12.2022)
7. Краткий путеводитель по беспроводным технологиям «Интернета вещей». Часть 1. Сети, шлюзы, облака и протоколы [Электронный ресурс] // Портал журнала Control Engineering Россия. URL: clck.ru/347bXx (дата обращения: 03.03.2023)
8. Навигационные услуги с использованием СУДС [Электронный ресурс] // ФГУП Росморпорт. URL: https://www.rosmorport.ru/filials/vlf_serv_vts/ (дата обращения: 27.03.2023).
9. Обеспечение дистанционной поддержки [Электронный ресурс] // Информационный портал TADVISER. URL: <https://clck.ru/32nm5t> (дата обращения: 26.11.2022)
10. Основы беспроводных сетей [Электронный ресурс] // База знаний Академия Инфинет. URL: <https://academy.infinetwireless.com/ru/online-education/rtghtyh/8> (дата обращения: 01.07.2022)
11. Перевалов М. Устойчивая связь берега с судном, мобильный интернет и многое другое // Морские порты. 2019. № 3(174). С. 58–59.
12. Петросьян А.В. Система приоритетов в оповещении операторов СУДС // Статья в журнале Транспортное дело России - 2018. – Номер 3 Часть 2 – С. 128–132. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35136143> (дата обращения: 26.11.2022)
13. Приказ Минтранса России от 12.11.2021 N 395 "Об утверждении Общих правил плавания и стоянки судов в морских портах Российской Федерации и на подходах к ним" (Зарегистрировано в Минюсте России 01.06.2022 N 68677) [Электронный ресурс] // Интернет портал Консультант Плюс. URL: <https://clck.ru/33vVJM>. (дата обращения: 23.03.2023).
14. Руководство разработчика устройств LoRaWAN сети ЛАРТЕХ Версия 1.1 [Электронный ресурс] // Сайт компании Лартех. URL: <https://lar.tech/images/pdf/lorawan-lartech.pdf> (дата обращения: 23.03.2023).
15. Скважник И.С. Инфраструктура связи системы управления движением судов в рамках стратегии е-Навигации // Тезисы докладов пятой Всероссийской молодежной научной конференции, посвященной дню радио и связи и 75-летию победы в Великой Отечественной войне "Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития". - 2020. – с. 192 – 194. URL: <http://radio.tstu.ru/inf/sbornik2020-1.pdf> (дата обращения: 06.03.2023)
16. Скважник И.С. Современные технологии в системе управления движением судов в рамках концепции е-Навигации: мировой опыт и региональные особенности (обзор) // Статья в журнале Вестник инженерной школы ДВФУ – 2021. – Номер 2(47) – С. 50–65. URL: <https://journals.dvfu.ru/vis/article/view/181> (дата обращения: 20.11.2022)
17. Скважник И.С., Л.Г. Стаценко Применение технологии беспроводного широкополосного доступа для построения сети связи и передачи данных в системе управления движением судов морского порта Владивосток / И.С. Скважник, Л.Г. Стаценко // Тезисы докладов второй Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований". 2019. - ч. 3. - с. 74 - 76. URL URL clck.ru/34924Q (дата обращения: 04.04.2023)
18. Скважник И.С., Совкова О.И., Стаценко Л.Г. Анализ возможностей технологий беспроводного широкополосного доступа для обеспечения безопасности мореплавания в заливе Петра Великого / И.С. Скважник, О.И. Совкова, Л.Г. Стаценко // Вестник ИШ ДВФУ. – 2020. – №3 (44). – с. 104-120. ВАК, DOI: 10.24866/2227-6858/2020-3-11. URL: <https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/ddf/2020-3-11.pdf> (дата обращения: 23.03.2023).
19. Скважник И.С., Совкова О.И., Стаценко Л.Г., Турмов Г.П. Технологии беспроводного широкополосного доступа: оценка возможности применения для управления движением судов / И.С. Скважник, О.И. Совкова, Л.Г. Стаценко, Г.П. Турмов // Вестник ИШ ДВФУ. – 2019. – №4 (41). – с. 113-124. (ВАК, DOI: 10.24866/2227-6858/2019-4-12, URL: <https://www.dvfu.ru/vestnik/archive-editions/4-41/12/>) (дата обращения: 06.04.2023).
20. Соглашение о внедрении сети NB-IoT [Электронный ресурс] // Информационный портал TADVISER. [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/32nktZ> (дата обращения: 26.11.2022)

21. IoT Connectivity in Maritime Activities [Электронный ресурс] // News article - 18.07.2022. URL: <https://sateliot.space/en/iot-applications-maritime/> (дата обращения 28.11.2022)
22. Josh fruhlinger. What is IoT? The internet of things explained. [Электронный ресурс] // Network world website 07.08.2022. URL: <https://clck.ru/YLc2G> (дата обращения:03.02.2023)
23. Maritime industry slowly embracing potential of IIoT [Электронный ресурс] // Internet of business - News article. URL: <https://internetofbusiness.com/iot-maritime-industry-potential/> (дата обращения:25.11.2022)
24. Nic Garden. Practical uses for IoT in ship management [Электронный ресурс] // News article - 2020. URL: <https://thetius.com/practical-uses-for-iot-in-ship-management/> (дата обращения:25.11.2022)
25. Ramon Sanchez-Iborra, Ignacio G. Liano, Christian Simoes, Elena, Counago, Antonio F. Skrameta. Tracking and Monitoring System Based on LoRa Technology for Lightweight Boats. [Электронный ресурс] // Electronics 2019, 8(1), 15 URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/1/15> (дата обращения: 10.11.2022)
26. Rolls-Royce publishes vision of the future of remote and autonomous shipping [Электронный ресурс] // BiRolls-Royce official website – 21.06.2016. URL: <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2016/21-06-2016-rr-publishes-vision-of-the-future-of-remote-and-autonomous-shipping.aspx> (дата обращения:11.12.2022)
27. Sanchez-Iborra, R.; Sanchez-Gomez, J.; Ballesta-Viñas, J.; Cano, M.D.; Skarmeta, A. Performance evaluation of LoRa considering scenario conditions. [Электронный ресурс] // Sensors 2018, 18, 772. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/3/772> (дата обращения: 12.11.2022)
28. Skvarnik I.S. Wireless broadband access technology for building of communication and data transfer networks of vessel traffic management system / I.S. Skvarnik, O.I. Sovkova, L.G. Statsenko // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) Scopus, DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934744, URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8934744/authors#authors> (дата обращения: 08.04.2023).
29. Spreading factors [Электронный ресурс] // The things network Website. URL: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/spreading-factors/> (дата обращения:25.03.2023)

References

1. B.V., Mikhnevich. Vzaimodeystvie operatora SUDS i sudovoditelya pri provodke sudna [Interaction between VTS operator and navigator when piloting a vessel] / B.V. Afanas'ev, A.V. Mikhnevich B.V. Transportnoe delo Rossii 2018. Nomer 3, S. 106–107. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35136137> (дата obrashcheniya: 24.11.2022)
2. Bazarov Yu.I., Ismagilov M.I., Rogov A.N. Novaya morskaya tsifrovaya svyaz' dlya e-Navigatsii [New maritime digital communication for e-Navigation]. Transport Rossiyskoy Federatsii. 2018. № 3(76). S. 48–54.
3. Buzenkov, I. I., Rodygina I.V., Dukhnich E.I., Shcherbakov A.I. Model' intellektual'noy sistemy vizualizatsii tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya SUDS [Model of an intelligent system for visualising the technical condition of the VTS equipment]. I. I. Buzenkov, I.V. Rodygina, E.I. Dukhnich, A.I. Shcherbakov. Ekspluatatsiya morskogo transporta. FGBOU VO «GMU im. adm. F.F. Ushakova», 2021. № 4(101). S. 194–196. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47346059> (дата obrashcheniya: 27.11.2022) – Tekst: elektronnyy.
4. V.A., Pershina, N.D. Titova, M.S. Stepanov. Postroenie avtomatizirovannoy sistemy sbora dannyh s priborov uchjota na baze standarta LoRaWAN [Building an automated data collection system from metering devices based on the LoRaWAN standard] / V.A. Pershina, N.D. Titova, M.S. Stepanov // Telekomunikacionnye ustrojstva i sistemy - 2019. – Nomer 2 – S. 3–9. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42403690> (дата obrashcheniya: 01.07.2023)
5. V. Bakhur. Internet veshchey ot Orange Business Services pomozhet GK «Dobroflot» sekonomit' na goryuchem [The Internet of Things from Orange Business Services will help Dobroflot to save on fuel] [Elektronnyy resurs]. Informatsionnyy portal C News URL: https://www.cnews.ru/news/line/2018-05-22_internet_veshchey_ot_orange_business_services_pomozhet (дата obrashcheniya: 28.11.2022).
6. Infrastruktura vodnogo transporta [Water transport infrastructure] [Elektronnyy resurs]. Federal'noe agentstvo morskogo i rechnogo transporta. URL: <https://morflot.gov.ru/glavnaya/intmap.html> (дата obrashcheniya: 07.12.2022)
7. Kratkiy putevoditel' po besprovodnym tekhnologiyam «Interneta veshchey» [A short guide to wireless IoT technologies]. Chast' 1. Seti, shlyuzy, oblaka i protokoly [Elektronnyy resurs]. Portal zhurnala Control Engineering Rossiya. URL: clck.ru/347bXx (дата obrashcheniya: 03.03.2023)
8. Navigatsionnye uslugi s ispol'zovaniem SUDS [Navigational services using VTS] [Elektronnyy resurs]. FGUP Rosmorport. URL: https://www.rosmorport.ru/filials/vlf_serv_vts/ (дата obrashcheniya: 27.03.2023).
9. Obespechenie distantsionnoy podderzhki [Providing remote support] [Elektronnyy resurs]. Informatsionnyy portal TADVISER. URL: <https://clck.ru/32nm5t> (дата obrashcheniya: 26.11.2022)
10. Osnovy besprovodnyh setej [Fundamentals of wireless networks] [Jelektronnyy resurs] // Baza znaniy Akademija Infinet. URL: <https://academy.infinetwireless.com/ru/online-education/rtgtyh/8> (дата obrashcheniya: 01.07.2022)
11. Perevalov M. Ustoychivaya svyaz' berega s sudnom, mobil'nyy internet i mnogoe drugoe [A stable shore-to-ship connection, mobile internet and more]. Mor-skie porty. 2019. № 3(174). S. 58–59.
12. Petros'yan A.V. Sistema prioritetov v opoveshchenii operatorov SUDS [Priority system in alerting VTS operators]. Sta'ya v zhurnale Transportnoe delo Rossi - 2018. Nomer 3 Chast' 2. S. 128–132. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35136143> (дата obrashcheniya: 26.11.2022)
13. Prikaz Mintransa Rossii ot 12.11.2021 N 395 "Ob utverzhdenii Obshchikh pravil plavaniya i stoyanki sudov v morskikh portakh Rossiyskoy Federatsii i na podkhodakh k nim" [Order of the Ministry of Transport of Russia dated 12.11.2021 N 395 "On Approval of General Rules for Navigation and Mooring of Ships in Seaports of the Russian Federation and on approaches to them"]. (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 01.06.2022 N 68677) [Elektronnyy resurs]. Internet portal Konsul'tant Plyus. URL: <https://clck.ru/33vVJM>. (дата obrashcheniya: 23.03.2023).

14. Rukovodstvo razrabotchika ustryostv LoRaWAN seti LARTEKh Versiya 1.1 [LARTEX LoRaWAN Developer's Manual Version 1.1]. [Elektronnyy resurs]. Sayt kompanii Lartekh. URL: <https://lar.tech/images/pdf/lorawan-lartekh.pdf> (data obrashcheniya: 23.03.2023).
15. Skvarnik I.S. Infrastruktura svyazi sistemy upravleniya dvizheniem sudov v ramkakh strategii e-Navigatsii [Vessel traffic management system communication infrastructure within the e-Navigation strategy]. Tezisy dokladov pyatoy Vserossiyskoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy dnyu radio i svyazi i 75-letiyu pobedy v Velikoy Otechestvennoy voyne "Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya". 2020. s. 192 – 194. URL: <http://radio.tstu.ru/inf/sbornik2020-1.pdf> (data obrashcheniya: 06.03.2023)
16. Skvarnik I.S. Sovremennyye tekhnologii v sisteme upravleniya dvizheniem sudov v ramkakh kontseptsii e-Navigatsii: mirovoy opyt i regional'nye osobennosti (obzor) [Modern technologies in ship traffic management within the concept of e-Navigation: global experience and regional specificities (overview)]. Sta'ya v zhurnale Vestnik inzhenernoy shkoly DVFU 2021. Nomer 2(47), S. 50–65. URL: <https://journals.dvfu.ru/vis/article/view/181> (data obrashcheniya: 20.11.2022)
17. Skvarnik I.S., L.G. Statsenko Primenenie tekhnologii besprovodnogo shirokopolosnogo dostupa dlya postroeniya seti svyazi i peredachi dannykh v sisteme upravleniya dvizheniem sudov morskogo porta Vladivostok [Application of wireless broadband access technology for building a communication and data transmission network in the Vladivostok seaport traffic control system]. I.S. Skvarnik, L.G. Statsenko. Tezisy dokladov vtoroy Vserossiyskoy natsional'noy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Molodezh' i nauka: aktual'nye problemy fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy". 2019. - ch. 3. s. 74 - 76. URL: clck.ru/34924Q (data obrashcheniya: 04.04.2023)
18. Skvarnik I.S., Sovkova O.I., Statsenko L.G. Analiz vozmozhnostey tekhnologiy besprovodnogo shirokopolosnogo dostupa dlya obespecheniya bezopasnosti moreplavaniya v zalive Petra Velikogo [Analysis of wireless broadband access technologies for maritime safety in Peter the Great Bay]. I.S. Skvarnik, O.I. Sovkova, L.G. Statsenko. Vestnik ISh DVFU. 2020. №3 (44). c. 104-120. VAK, DOI: 10.24866/2227-6858/2020-3-11. URL: <https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/ddf/2020-3-11.pdf> (data obrashcheniya: 23.03.2023).
19. Skvarnik I.S., Sovkova O.I., Statsenko L.G., Turmov G.P. Tekhnologii besprovodnogo shirokopolosnogo dostupa: otsenka vozmozhnosti primeneniya dlya upravleniya dvizheniem sudov [Wireless broadband access technologies: assessing the feasibility of applications for ship traffic management]. I.S. Skvarnik, O.I. Sovkova, L.G. Statsenko, G.P. Turmov. Vestnik ISh DVFU. 2019. №4 (41). s. 113-124. (VAK, DOI: 10.24866/2227-6858/2019-4-12, URL: <https://www.dvfu.ru/vestnikis/archive-editions/4-41/12/>) (data obrashcheniya: 06.04.2023).
20. Soglashenie o vnedrenii seti NB-IoT [NB-IoT network implementation agreement]. [Elektronnyy resurs]. Informatsionnyy portal TADVISER. [Elektronnyy resurs]. URL: <https://clck.ru/32nktZ> (data obrashcheniya: 26.11.2022)
21. IoT Connectivity in Maritime Activities [Elektronnyy resurs]. News article 18.07.2022. URL: <https://sateliot.space/en/iot-applications-maritime/> (data obrashcheniya 28.11.2022)
22. Josh fruhlinger. What is IoT? The internet of things explained. [Elektronnyy resurs]. Network world website 07.08.2022. URL: <https://clck.ru/YLc2G> (data obrashcheniya: 03.02.2023)
23. Maritime industry slowly embracing potential of IIoT [Elektronnyy resurs]. Internet of business. News article. URL: <https://internetofbusiness.com/iot-maritime-industry-potential/> (data obrashcheniya:25.11.2022)
24. Nic Garden. Practical uses for IoT in ship management [Elektronnyy resurs]. News article 2020. URL: <https://thetius.com/practical-uses-for-iot-in-ship-management/> (data obrashcheniya:25.11.2022)
25. Ramon Sanchez-Iborra, Ignacio G. Liano, Christian Simoes, Elena, Counago, Antonio F. Skrameta. Tracking and Monitoring System Based on LoRa Technology for Lightweight Boats. [Elektronnyy resurs]. Electronics 2019, 8(1), 15 URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/1/15> (data obrashcheniya:10.11.2022)
26. Rolls-Royce publishes vision of the future of remote and autonomous shipping [Elektronnyy resurs]. BiRolls-Royce official website 21.06.2016. URL: <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2016/21-06-2016-rr-publishes-vision-of-the-future-of-remote-and-autonomous-shipping.aspx> (data obrashcheniya:11.12.2022)
27. Sanchez-Iborra, R.; Sanchez-Gomez, J.; Ballesta-Viñas, J.; Cano, M.D.; Skarmeta, A. Performance evaluation of LoRa considering scenario conditions. [Elektronnyy resurs]. Sensors 2018, 18, 772. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/3/772> (data obrashcheniya:12.11.2022)
28. Skvarnik I.S. Wireless broadband access technology for building of communication and data transfer networks of vessel traffic management system. I.S. Skvarnik, O.I. Sovkova, L.G. Statsenko. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) Scopus, DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934744, URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8934744/authors#authors> (data obrashcheniya: 08.04.2023).
29. Spreading factors [Elektronnyy resurs]. The things network Website. URL: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/spreading-factors/> (data obrashcheniya:25.03.2023)

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

Артём Евгеньевич Фатеев, магистрант Дальневосточный федеральный университет 690922, Владивосток, остров Русский, п. Аякс, 10., email: artyomftv@gmail.com

Artyom E. Fateev, graduate student, Far Eastern Federal University Campus 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922, email: artyomftv@gmail.com

Игорь Святославович Скварник, кандидат технических наук, доцент департамента электроники и приборостроения, Дальневосточный федеральный университет 690922, Владивосток, остров Русский, п. Аякс, 10., e-mail: wbhm@yandex.ru

Igor S. Skvarnik, Ph.D. (Eng), assistant professor Department of Electronics and Instrumentation, Far Eastern Federal University Campus 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922 Russia, e-mail: wbhm@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 28.04.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 21.07.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 01.08.2023

Научная статья

УДК 629.5.061

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.010>

Математические модели в отладочных стендах для судовых систем управления

Е.Б. Амбросовская^{1,2} e-ambr@mail.ru, В.М. Амбросовский¹ v-ambr@mail.ru,

Д.В. Ромаев² d.romaev@navis.spb.ru,

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И.Ульянова (Ленина), ²Навис

Аннотация. Работа посвящена роли математических моделей в отладочных стендах для судовых систем управления, то есть таких программно-аппаратных комплексов, которые позволяют имитировать все интерфейсные сигналы – как аналоговые и дискретные, так цифровые, и отладить по возможности основные алгоритмы управления, максимально сократить время на отладку системы на борту судна. Рассмотрены особенности стендов для систем управления движением и маневрированием (на примере системы управления курсом судна и системы управления динамическим позиционированием) и для систем управления техническими средствами. Дана классификация таких стендов, указан состав необходимых математических моделей. Отмечена важность моделирования различных отказов и сбоев, в том числе динамических. Приведены математические модели движения судна для стендов системы управления курсом судна и системы управления динамическим позиционированием в общем виде, рассмотрены требуемые свойства для различных задач. Проанализированы свойства математических моделей, предложенных международными стандартами для отладки управления по траектории. Предложены структуры математических моделей навигационных датчиков и приводов средств управления для стендов, а также описаны требования к моделированию электроэнергетической установки для систем управления динамическим позиционированием.

Ключевые слова: Управление движением, управление техническими средствами, отладочные стенды, математическая модель, авторулевой, управление на траектории, динамическое позиционирование, программно-аппаратный комплекс.

Для цитирования: Амбросовская Е.Б., Амбросовский В.М., Ромаев Д.В. Математические модели в отладочных стендах для судовых систем управления 2023. № 3 часть 1, С. 89—97. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.010

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.010>

Mathematical models in ship control systems testbench

Elena B. Ambrosovskaia^{1,2} e-ambr@mail.ru, Victor M. Ambrosovsky¹ v-ambr@mail.ru,

Dmitry V. Romaev² d.romaev@navis.spb.ru

¹ St. Petersburg state Electrotechnical University “LETI”, Russian Federation, ²Navis JSC, St-Petersburg, Russia

Abstract. The work is devoted to the role of mathematical models in testbenches for ship control systems, that is, such software and hardware systems that allow you to simulate all interface signals - both analog and discrete, and digital, and debug, if possible, the main control algorithms, minimize the time for debugging the system on board the ship. The features of stands/testbenches for motion and maneuvering control systems (on the example of a vessel heading control system and a dynamic positioning control system), a technical means control system are considered. The classification of such testbenches is given, the composition of the necessary mathematical models is discussed. The importance of modeling various faults and failures, including dynamic ones, is noted. Mathematical models of ship motion for the testbenches of the ship's heading control system and dynamic positioning control system in general form are given, the required properties for various tasks are considered. The properties of mathematical models proposed by international standards for debugging track control systems are analyzed. The structures of mathematical models of navigation sensors and actuators for testbenches are proposed, and the requirements for simulation an electric power plant for dynamic positioning control systems are described.

Keywords: motion control, testbench, mathematical model, yaw dynamics, track control, dynamic positioning, autopilot, technical means control system

For citation: Elena B. Ambrosovskaia, Victor M. Ambrosovsky, Dmitry V. Romaev, Mathematical models in ship control systems testbench, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 1, P. 89—97. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.010

Введение

При разработке систем управления движением и маневрированием (САУДиМ) необходимо проверять разрабатываемые алгоритмы управления, тестировать программное обеспечение, обучать

сервисных инженеров, проводить заводские испытания. Все эти работы выполняются на отладочном стенде (testbench). Отладочный стенд – это программно-аппаратный комплекс, который позволяет имитировать все сигналы и отладить по возможности основные алгоритмы управления,

максимально сократить время на отладку системы на борту.

С функциональной точки зрения, стенд заменяет собой (имитирует) оборудование, установленное на судне, и должен обеспечивать моделирование всех необходимых сигналов с учетом динамики объекта.

В общем случае, стенд для отладки системы управления движением состоит из моделирующего компьютера и устройств сопряжения. Устройство сопряжения обеспечивает ввод и вывод аналоговых и дискретных сигналов (дискретные – силовые сигналы и сухие контакты, аналоговые – токи и напряжения), а также цифровые подключения (Ethernet, RS232/422, CAN, и прочие интерфейсы). В некоторых случаях дополнительно может быть установлен отдельный компьютер для 3D-визуализации.

Системы управления техническими средствами (СУ ТС) отличаются от САУДиМ количеством сигналов и сложностью алгоритмов (САУДиМ имеет меньшее количество сигналов, но более сложные алгоритмы управления, обработки данных), в то время как СУТС система большего объема с большим количеством сигналов и (как правило однотипных) функциональных блоков.

Рассмотрим общие принципы построения отладочных стендов, а также специфику отладочных стендов на примере двух систем управления движением - авторулевого (системы управления курсом судна) [Ошибка! Источник ссылки не найден.,Ошибка! Источник ссылки не найден.] и системы управления динамическим позиционированием СУ ДП [Ошибка! Источник ссылки не найден.,Ошибка! Источник ссылки не найден.,Ошибка! Источник ссылки не найден.,Ошибка! Источник ссылки не найден.], а также для системы управления техническими средствами.

Многие производители систем управления движением имеют отладочные стенды, однако, полнофункциональные стенды на базе математических моделей до сих пор не стали стандартом отрасли. Так, компания Marine Cybernetics разработала концепцию HiL “hardware in the loop”, которая позволяет проверять функционал СУ ДП. В 2005 году Т.Фоссен в работе [Ошибка! Источник ссылки не найден.] поясняет концепцию HiL как что-то революционное. Однако, уже в 2000 году для первых разрабатываемых СУ ДП компании Навис уже были программно-аппаратные стенды, позволяющие проверить большую часть функциональности. Об этом (несколько с опозданием, так как для автора и коллег это было практически необходимым при разработке любой САУДиМ) было рассказано в работе [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. По опыту работы в области математических моделей движения для навигационных тренажеров, казалось очевидным, что динамические модели движения судна, приводов средств управления, датчиков являются необходимыми для настройки и проверки алгоритмов.

Отличие отладочного стенда (рис. 1) от тренажера (рис.2) в том, что в тренажере как правило отсутствует аппаратная часть, присутствует 3D-визуализация, нет ориентированности на глубокое тестирование с учетом разнообразных отказов и

сбоев. В таблице 1 приведена классификация отладочных стендов [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

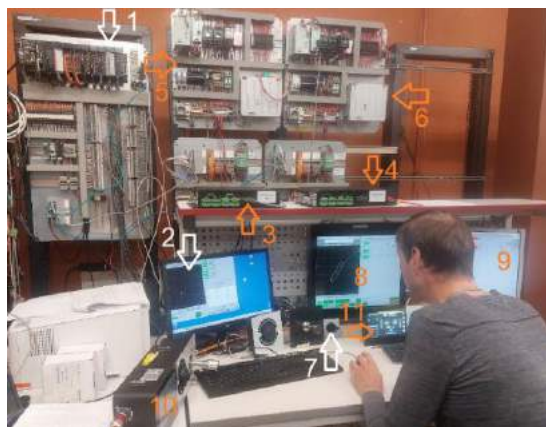


Рис. 1. СУДП стенд типа L, АО Навис с установленной на нем СУ ДП класса ДП1
1 – интерфейсный прибор стенда, 2 – рабочая станция стенда, 3, 4 - вычислители СУ ДП, 5, 6 – приборы ввода-вывода системы СУ ДП, 7 – переключатель режимов, 8, 9 – мониторы СУ ДП, 10 – выносная панель управления, 11 – панель управления

Таблица 1.

Классификация стендов для СУДП

Тип	S	M	L
Описание	Программный симулятор – САУДиМ работает совместно с математической моделью на одном компьютере	Моделирующее программное обеспечение развернуто на отдельном компьютере	Стенд, обеспечивающий симуляцию и реализацию физических интерфейсов
Назначение	Тестирование алгоритмов, в том числе в быстром времени	Тестирование системы в целом без тестирования физических интерфейсов	Тестирование системы в целом с возможностью тестирования физических интерфейсов
Подключение	САУДиМ и модель работают на одном компьютере	САУДиМ и модель соединены виртуально или по Ethernet	САУДиМ и модель соединены через реальные физические интерфейсы

Специфика отладочных стендов для авторулевых

Авторулевой или система управления курсом судна имеет интерфейсы с навигационными датчиками, с электронной картографической системой ЭКНИС (для выполнения функции следования по маршруту), управляющие сигналы выдает на рулевую машину (рис.3).



Рис.2 Тренажер СУ ДП на выставке (тренажер компания SimTex, СУДП DP5000, АО Навис)

Авторулевой является «полочным» или «коробочным» продуктом, и каждый его экземпляр проверять на специфическом стенде не требуется.

Проверка авторулевого на стенде осуществляется в следующих случаях

1. Разработка новых алгоритмов (и как следствие – их тестирование)
2. Тестирование программного обеспечения на соответствие изменившимся правилам классификационных обществ
3. Тестирование совместной работы авторулевого и других систем (ЭКНИС, СУ ДП)

Для тестирования авторулевого на стенде как правило используются типовые модели судов [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Как правило, производители имеют свой «парк» математических моделей, отвечающих необходимым требованиям.

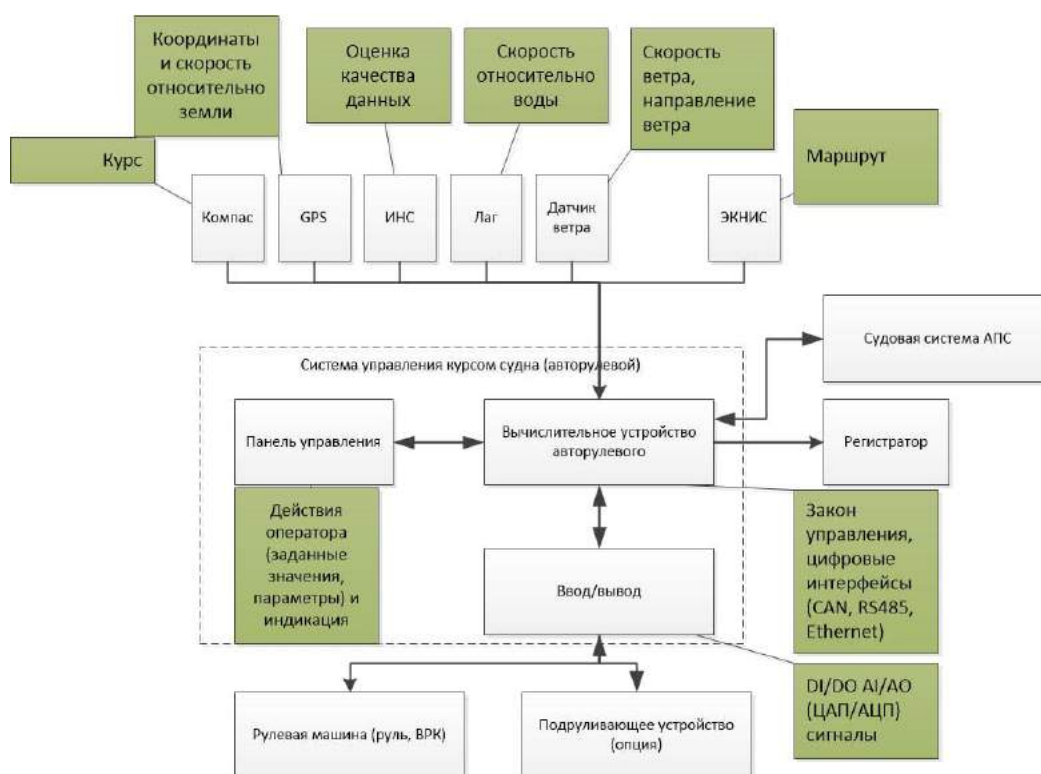


Рис.3. Система управления курсом судна (авторулевой)

Для тестирования управления по курсу необходимо иметь математическую модель, которая позволяет учитывать:

- устойчивость судна на курсе;
- поворотливость судна;
- динамику судна при движении по траектории;
- ветро-волновые возмущения.

Помимо этого, для тестирования системы управления курсом необходимо проверять ее в случае отказов и сбоев датчиков и средств управления.

Основной датчик для авторулевого – датчик курса. Для тестирования авторулевого необходимо рассмотреть случаи следующих отказов датчика курса:

- потеря данных курса;
- нарушение регулярности прихода данных по курсу;
- сбой в данных по курсу;
- шумы в данных по курсу.

В связи с большим распространением спутниковых компасов, помимо шумов и погрешностей, характерных для гирокомпасов, для случая спутниковых компасов следует учесть скачкообразное изменение курса на 2-3 градуса в момент смены «созвездия» спутников.

Помимо данных по курсу, авторулевой использует также данные по скорости хода, а также по местоположению судна от спутниковой системы. В таких данных также возможны пропадания, шумы, запаздывания, сбой.

Специфика отладочных стендов для системы управления динамическим позиционированием

Система управления динамическим позиционированием (СУ ДП) управляет судном преимущественно на малых ходах, позволяет удерживать точку, курс, управлять судном на траектории и в различных специфических режимах. Структура СУ ДП приведена на рис.4.

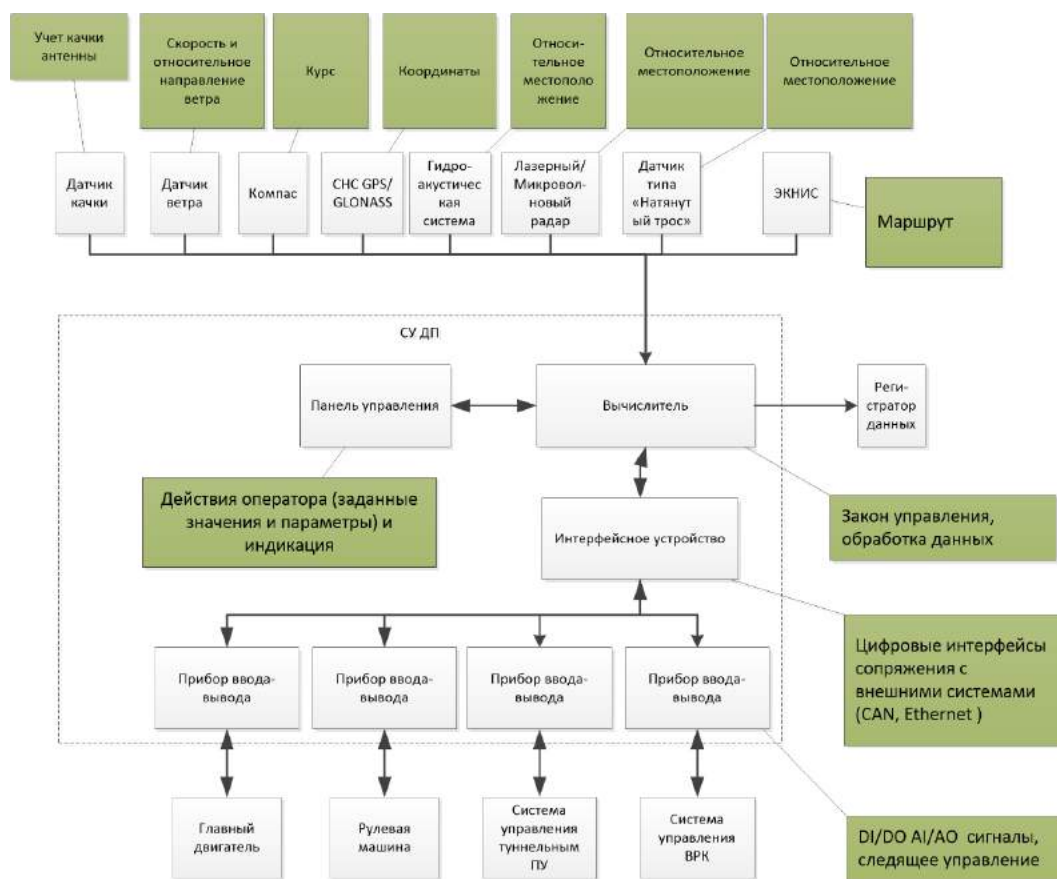


Рис.4. Структура СУДП

По цифровым интерфейсам передаются данные датчиков, систем определения местоположения и в некоторых случаях сигналы – например, на современных судах система СУ ДП часто получает сигналы от судовой электроэнергетической системы (СЭЭС) по цифровой шине. СУ ДП не является «коробочным» продуктом, разрабатывается с учетом специфики каждого конкретного судна, поэтому важно на стенде обеспечить именно те виды интерфейсов, которые присутствуют на реальном судне, с возможностью моделирования обрыва передачи данных по этим интерфейсам.

Принципиальным является то, что математические модели движения для каждой конкретной СУ ДП должны соответствовать конкретному объекту управления. Это несколько повышает трудоемкость разработки системы, но позволяет выполнить предварительную настройку регуляторов и проанализировать свойства системы до морских испытаний и существенно понизить этим длительность этих испытаний. «Золотым стандартом» является также настройка встроенного симулятора с учетом свойств объекта управления, для чего требуется провести идентификацию некоторых параметров математической модели по данным натурных испытаний на борту. Кроме того, уже для работающих систем требуется демонстрировать особенности функций САУДиМ экипажу, проводить обучение на борту, для этого системы управления с (например, СУ ДП) удобно дополнять встроенным симулятором.

К алгоритмам обработки данных в СУ ДП предъявляются требования, которые должны быть

проверены на стенде, в частности проверить следующие обязательные для ДП2 класса алгоритмы:

- drift test – диагностика медленного ухода данных одного датчика от другого. Такой тест требует возможности промоделировать уход одного или нескольких датчиков;
- median test – диагностика выброса или ухода одного датчика от других в случае работы 3х и более датчиков (курса или систем определения местоположения).

Для обеспечения проверки таких алгоритмов необходимо моделировать медленный уход, а также скачок в данных всех датчиков.

Алгоритмы управления СУ ДП требуют корректного описания сил, создаваемых средствами управления судном, следовательно, математическая модель должна описывать эти силовые воздействия.

Математическая модель движения судна

Математическая модель для отладочного стенда должна моделировать динамику объекта с учетом действующих возмущений. Для СУ ДП необходимо иметь математическую модель пространственного управления движением судна. В традиционных отечественных обозначениях [Ошибка! Источник ссылки не найден.], уравнения пространственного движения имеют вид:

$$\begin{aligned}
 m_x \dot{v}_x + m \omega_y v_z - m \omega_z v_y &= F_{xh} + F_{xa} + F_{xu} + F_{xw}, \\
 m_y \dot{v}_y + m \omega_z v_x - m \omega_x v_z &= F_{yh} + F_{ya} + F_{yu} + F_{yw}, \\
 m_z \dot{v}_z + m \omega_x v_y - m \omega_y v_x &= F_{zh} + F_{zu} + F_{zw}, \\
 J_x \dot{\omega}_x &= M_{xh} + M_{xu} + M_{xw},
 \end{aligned}$$

$$J_y \dot{\omega}_y + (J_x - J_z) \omega_x \omega_z = M_{yh} + M_{yu} + M_{yw},$$

$$J_z \dot{\omega}_z + (J_x - J_y) \omega_x \omega_y = M_{zh} + M_{za} + M_{zu} + M_{zw}.$$

Здесь уравнения записаны в осях системы, связанной с судном, ось x направлена в нос судна, ось y – на правый борт, ось z – направлена вниз. В правой части уравнений – гидродинамические силы (с индексом “h”)– к ним для краткости записи отнесены и восстанавливающие силы и моменты качки, аэродинамические силы (с индексом “a”), силы от средств управления (с индексом “u”), а также силы от внешних возмущений (с индексом “w”). Иногда используют также левую систему координат, направляя z вверх, а в некоторых работах - преимущественно это связано с управлением движением скоростными судами - используют систему координат, где ось x также направлена в нос судна, а ось z направлена на левый борт [Ошибка! Источник ссылки не найден.,Ошибка! Источник ссылки не найден.,Ошибка! Источник ссылки не найден.].

В зарубежной практике – в частности у [Ошибка! Источник ссылки не найден.] – используют другие обозначения, для удобства понимания они приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Обозначения

направлен ие перемещен ия	силы и моменты		линейные и угловые скорости		позиции и углы	
	Анг л.	Русс к.	Анг л.	Русс к.	Анг л.	Русс к.
литература						
Продольно е	X	F _x	u	v _x	x	x
боковое	Y	F _y	v	v _y	y	y
вертикальн ое	Z	F _z	ω	v _z	z	z
крен	K	M _x	p	ω _x	φ	θ
дифферент	M	M _y	q	ω _y	θ	ψ
курс	N	M _z	r	ω _z	ψ	φ

Математическая модель движения должна отражать реальные свойства объекта, важные при настройке и проверке системы управления движением.

Для систем управления движением особенно важными являются управляющие силы и моменты, создаваемые средствами управления. Однако, большая сложность математической модели движения может усложнять процесс ее настройки для конкретного объекта, поэтому для конкретной задачи требуется по возможности упростить математическую модель движения.

Так, для СУ ДП весьма важным является движение на малых ходах на глубокой воде, качка требуется лишь для учета качки антенны (только качественные характеристики), а вот значения управляющих сил при изменении управляющих воздействий в режимах, близких к швартовному, должна быть максимально точной. Важными также являются массовые характеристики – и моделирование переменной загрузки, если судно работает в режимах, когда масса меняется в процессе выполнения операций. Важными также являются течение (при наличии которого при

удержании в точке возникают весьма существенные гидродинамические силы) и ветро-волновые воздействия.

Для проверки системы управления курсом судна (режим управления курсом) можно использовать более простые математические модели типа Номото (но только для устойчивых на курсе судов). В целом желательно иметь более сложную математическую модель. Для проверки движения на курсе и на траектории (как компромисс между упрощенной и более сложной моделью) в международном стандарте [Ошибка! Источник ссылки не найден.] IEC62065:2014 предложена математическая модель следующей структуры:

$$\dot{u}_g = K_u X' + v_g r - u_w / \tau_u$$

$$M_v \dot{v}_g = -M_v u_g r - R_v v_w$$

$$\dot{r} = K'_r \left(\frac{K_u X' \tau_u}{L} \delta_a + W' \right) + \gamma L \frac{M_v (v_w - \gamma L r)}{I_z \tau_v} - \frac{r}{\tau_r},$$

где r – угловая скорость рыскания; u_g, v_g – проекции скорости относительно земли на связанные оси судна (продольная и поперечная соответственно); X' - безразмерный упор винтов в % (рассматривается только синхронное управление винтами без режимов «раздвая»); M_v – масса (с учетом присоединенной массы, соответствующей поперечному движению); I_z = $\frac{M_v L^2}{12}$ – момент инерции относительно вертикальной оси; δ_a- угол перекадки руля; R_v- линейный коэффициент сопротивления; W' - безразмерное волновое возмущение; v_w – продольная скорость судна относительно воды; L – длина судна; γ- коэффициент, влияющий на устойчивость на курсе; K_u - коэффициент тяги винта; K'_r- коэффициент момента руля; постоянные времени τ_u, τ_v, τ_r.

Указанные параметры приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Параметр	Судно А (паром)	Судно В (контейнеровоз)	Судно С (танкер)
L	60	250	350
T _p (s)	20	30	30
T _δ (s)	12	30	30
u _{max} (kn)	30	25	10
τ _u (s)	150	600	800
τ _v (s)	2	4	36
τ _r (s)	4	23	46
γ	-0.05	0	0

Модель движения судна также дополнена моделью перекадки руля и изменения тяги гребного винта с заданными временами изменения от минимума до максимума T_p и T_δ соответственно.

Такая модель учитывает разгон и торможение судна (правда, с не вполне адекватной динамикой), позволяет получить нелинейную диаграмму управляемости (для судна А – рис.5.), то есть несколько сложнее скажем математической модели Номото 1го порядка, которую предлагает стандарт 16329:2003 для скоростных судов [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

На рис.5, 6, 7 приведены диаграммы управляемости судов разных типов: А, В, С.

Приведенная математическая модель обладает определенными недостатками, однако для сертификации по требованиям классификационных обществ демонстрация работы авторулевой на данной модели обязательна.

Для нужд разработчиков желательно иметь более детальную математическую модель, позволяющую учитывать более сложные маневры.

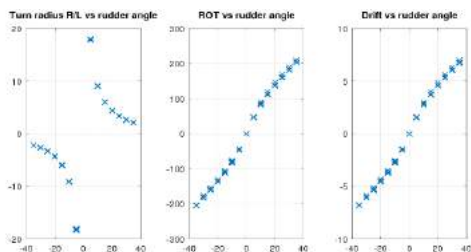


Рис.5. Судно А (30 уз)

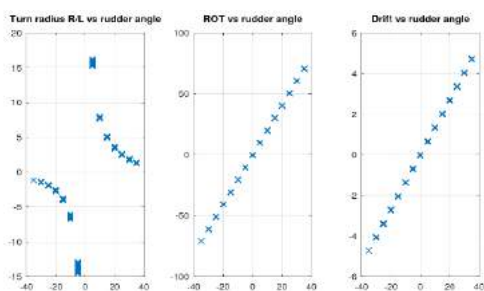


Рис.6. Судно Б (25 уз)

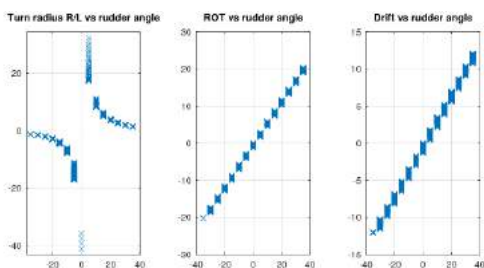


Рис.7. Судно С 10 уз

Особенно это важно для особых режимов движения (с дополнительной нагрузкой – например, с тралом для рыболовных судов, на различных скоростях движения в том числе с учетом изменения поворотливости для скоростных судов, а также для проверки режимов, в которых одновременно управляют рулями и подруливающими устройствами (Thrust assistance).

Важным фактором является также моделирование ветро-волновых возмущений.

Для волнового воздействия может использоваться какая-то упрощенная модель (как это предлагается, например, в стандарте ISO 16329:2003 – рис.8. Здесь предлагается моделировать волнение как дополнительный угол перекладки руля,

определяемый заданной таблицей от времени. Такая упрощенная модель может позволять тестировать авторулевой в режиме удержания на курсе.

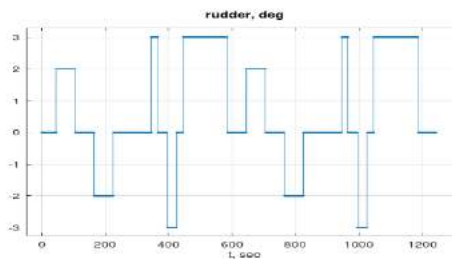


Рис.8. Волнение как дополнительный угол перекладки руля

Более сложную, хоть и упрощенную математическую модель предлагает IEC62065. Здесь предлагается также вводить возмущение как слагаемое, работающее как дополнительный угол перекладки руля, однако параметры его не затабулированы/фиксированы как в прошлом случае, а вычисляются по некоторому алгоритму. На рис.9. показан пример такого воздействия.

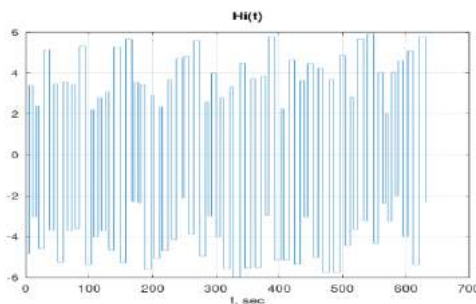


Рис.9. Волнение IEC62065, Sea State 5

Можно также использовать полигармоническую [Ошибка! Источник ссылки не найден.] или случайную [Ошибка! Источник ссылки не найден.] модель морского волнения, определяемую по спектру волнения для данной интенсивности с учетом характеристик волнения и судна. Такой способ является более физически обоснованным.

Математическая модель навигационного датчика

Для каждого из используемых датчиков следует учесть, таким образом, следующие отказы и сбои:

- потеря данных;
- нарушение регулярности прихода данных;
- запаздывание измерений;
- характерные сбои;
- шумы.

Шумы должны соответствовать физическим принципам датчика. Так, характерный график реальных данных двух ГНСС приведен на рис.10.

Для лазерных радаров, широко используемых в СУ ДП как систем определения местоположения, отказы и сбои иного характера.

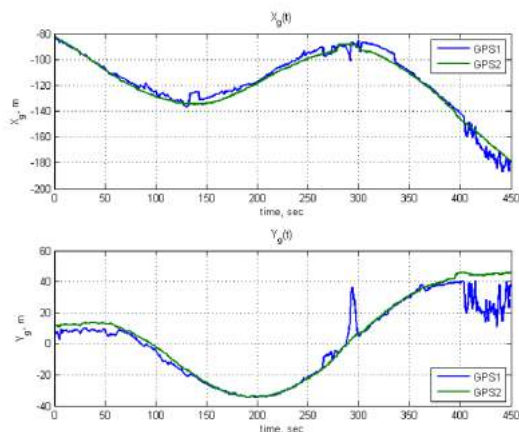


Рис. 10. Сбои в работе ГНСС

В целом лазерные радары имеют высокочастотный шум, однако частый отказ – увеличение уровня шума или скачок, причиной которого может быть захват посторонней цели, а также прием переотраженного сигнала от воды или иной поверхности. Возможны также искажения вследствие неверного определения углов.

Математическая модель привода

Средства управления - гребные винты регулируемого шага, рули, винторулевые колонки (ВРК) по углу поворота – имеют локальную систему со следящим приводом (по углу разворота лопасти, углу перекадки руля, развороту ВРК и т.п.).

Как правило привод представляет собой следящий электрогидропривод с постоянной или переменной скоростью перекадки - следующей структуры – рис.11.

Такой привод может быть описан нелинейным уравнением вида:

$$\dot{\delta} = f(\delta, u).$$

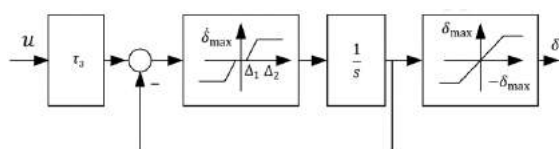


Рис.11 Структурная схема следящего привода

На рис.11 представлены следующие звенья – управляющий сигнал $u(t)$ поступает на звено задержки τ_3 , далее следует перекадка руля с заданной угловой скоростью (параметры нелинейного звена – максимальная скорость перекадки, зона нечувствительности Δ_1 и зона линейности Δ_2), и наконец ограничение по максимальной перекадке.

Необходимо дополнить математическую модель следующими отказами:

- обрыв управления;
- смещенное управление;
- запаздывание (здесь оно включено в мат модель, но при отказе может быть увеличено);
- уменьшенная скорость перекадки;
- шум в обратной связи;
- обработка со статической ошибкой.

В случае, если привод не является следящим (следящее управление реализуется на стороне САУДиМ), структура упрощается – управляющим воздействием будет заданная скорость перекадки. При необходимости можно повысить порядок модели, учтя динамику открытия и закрытия клапанов рулевой машины.

Ограниченный объем статьи не позволяет охватить все разнообразие приводов средств управления, приводных двигателей подруливающих устройств, винторулевых колонок, а также гребных винтов. Прежде всего требуется обеспечить моделирование динамики по частоте вращения с учетом используемого способа реверсирования (для СУ ДП это обычно высокооборотные дизельные двигатели с реверс-редуктором, либо электродвигатели – которые могут иметь задержку в момент переключения направления вращения гребного винта).

Математическая модель судовой электростанции

Для СУ ДП важным является отладить взаимодействие с судовой электростанцией. Переходные процессы по распределению активной и реактивной нагрузки в судовой электроэнергетической системе являются достаточно быстрыми по сравнению с динамикой судна, поэтому для отладочных стендов СУ ДП достаточным является моделирование следующих эффектов

- учет мощности, создаваемой генераторами, участвующими в электродвижении;
- учет потребляемой мощности электромоторами в зависимости от нагрузки;
- распределение активной мощности по секциям ГРЩ с учетом положения автоматических выключателей;
- учет дополнительных мощных потребителей (например, пожарных насосов);
- отказы автоматических выключателей.

Современные судовые электроэнергетические системы часто имеют цифровой интерфейс (как правило это Modbus TCP/RTU), стенд для проверки СУ ДП должен также иметь возможность работы по цифровым интерфейсам и напрямую по электрическим сигналам.

Специфика отладочных стендов для систем управления техническими средствами

Индивидуальный стенд требуется и для систем управления техническими средствами (СУ ТС). СУ ТС обеспечивает управление и мониторинг судовыми системами и установками (в частности, системой пожарной сигнализации и пожаротушения, общесудовыми системами, главной энергетической и электроэнергетической установками).

Стенд должен моделировать все сигналы, к которым СУ ТС имеет подключение – как реализованные в виде дискретных или аналоговых сигналов, так и цифровые интерфейсы. Так как СУ ТС во многом является информационной системой – то стенд должен давать возможность проверять неполадки в работе различных каналов связи и отказы и сбои в измерительных каналах.

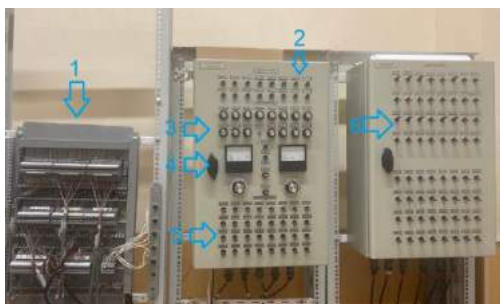


Рис. 12 Аппаратный стенд для проверки сигналов СУ ТС, компания ИЦ ИУС (1 - клеммы для подключения сигналов, 2 – индикация дискретных выходных сигналов, 3 – аналоговые входные сигналы, 4 – индикация аналоговых выходных сигналов, 5, 6 – дискретные входные сигналы

Для проверок прохождения всех сигналов в системе, отсутствия ошибок во внутреннем монтаже можно использовать простые, не требующие программирования аппаратные стенды. Пример такого стенда, идея которого была предложена в начале 2000х В.М.Амбросовским и реализована ИЦ ИУС, показана на рис.12.

Однако, аппаратный стенд не вполне удобен для проверки алгоритмов, реализованных в СУ ТС, для этой цели удобно иметь стенд с реализованными на нем имитационными математическими моделями, обеспечивающими проверку простых алгоритмов – например, пуск насоса, открытие клапана и т.п.

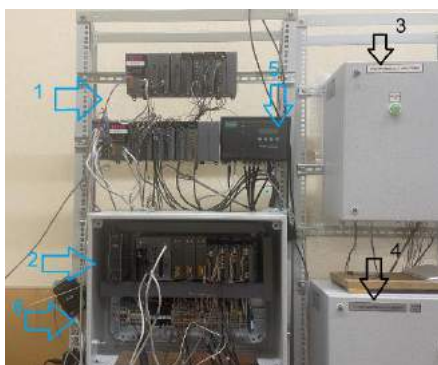


Рис. 13 Отладочный стенд для проверки СУ ТС, компания ИЦ ИУС: 1, 2 – контроллеры стенда; 3, 4 – часть приборов СУ ТС; 5, 6 – интерфейсные приборы для цифровых шин

Помимо этого, желательно провести пробные калибровки сигналов на стенде. Так, в работе [Ошибка! Источник ссылки не найден.] подробно рассмотрен вопрос пересчета сигналов уровня в цистернах неправильной формы по данным датчиков давления, подобные алгоритмы должны быть предварительно проверены на стенде.

Заключение

В работе рассмотрена роль математических моделей в отладочных стендах для различных видов систем автоматического управления. Рассмотрена общая структура математической модели движения судна, отмечены требования к свойствам математических моделей. Отмечена важность моделирования различных отказов и сбоев в данных.

Так, для СУ ДП отмечено, что математическая модель движения прежде всего должна отражать массовые характеристики, значения сил, создаваемых средствами управления, в требуемых режимах движения, а также учитывать течение и ветро-волновое возмущение. Такая математическая модель позволит заранее проверить функцию распределения упоров [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Важным при наличии соответствующих функций у СУ ДП является моделирование распределения активной нагрузки по секциям ГРЩ. Кроме того важными являются также модели приводов средств управления с учетом динамики и отказов.

Для системы управления курсом судна отмечено, что математическая модель должна отражать динамику движения судна по курсу с учетом возможной нелинейности диаграммы управляемости, а также позволять отлаживать функцию управления на траектории – то есть описывать горизонтальное движение с учетом рыскания. В качестве примера приведены математические модели, предложенные в международном стандарте [Ошибка! Источник ссылки не найден.] и проведен их анализ. Важной является также модель рулевого привода (или привода ВРК по углу) с учетом динамики и отказов, особенно при необходимости реализации прямого управления клапанами в рамках системы управления курсом судна.

Кратко указаны требования к математическим моделям в составе стенда для проверки СУ ТС.

Литература

1. Лукомский Ю.А., Чугунов В.С. Системы управления морскими подвижными объектами. Учебник. - Л.: Судостроение, 1988.
2. Амбросовский В.М., Корнев А.С Лукомский Ю.А., Шпекторов А.Г. Координированное управление морскими подвижными объектами / под ред. Ю.А. Лукомского. СПб: Изд-во СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2016.
3. H. Fay, Dynamic Positioning Systems, Principles, Design and Applications. // Paris, France: Editions Technip, 2005
4. Fossen, Thor. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control.// John Wiley & Sons, 2011
5. Johansen, Tor & Fossen, Thor & Vik, Bjornar. (2005). Hardware-in-the-loop Testing of DP systems.
6. E. Ambrosovskaya, P. Opekunov. "Approach for Advanced Testing of DP Control System" MTS DP Conference – Houston October 14-15, 2014
7. Оборудование и системы морской навигации и радиосвязи. Системы управления курсом судна. Требования к выполнению работы и характеристикам, методы испытания и необходимые результаты испытаний DIN EN 62065-2015 Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Track control systems – Operational and performance requirements, methods of testing and required test results (IEC 62065:2014). Международный (зарубежный) стандарт. Дата принятия 01 января 2015.
8. Справочник по теории корабля: в 3 т. Т. 3: Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания / под ред. Я. И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985

9. Амбросовский В.М., Амбросовская Е.Б. Математические модели движения переднего хода МПО для отладочных стендов. Деп. рук. ВИНТИ от 14.06.2018 (N62-B2018).
10. Международный стандарт по системам управления курсом судна ISO 11674 Ships and marine technology. Heading control systems (2019)
11. Ambrosovsky V., Rumyantsev S. Numerical simulation of nonregular wave disturbance in ship maneuvering motion simulation problems. Manoeuvring and Control of Marine Craft MCMC94, Southampton.
12. Амбросовский, В. М. Измерительные каналы в системах контроля и управления техническими средствами / В. М. Амбросовский, Е. Б. Амбросовская, И. С. Колпакова // Морской вестник. – 2017. – № 4(64). – С. 93-96

References

1. Lukomsky Yu., Chugunov V. Ship motion control systems. Leningrad, 1988.
2. Ambrosovsky V., Korenev A., Lukomsky Yu., Shpectorov A. Coordinated ship motion control. S-Peterburg, LETI, 2016.
3. H. Fay, Dynamic Positioning Systems, Principles, Design and Applications. // Paris, France: Editions Technip, 2005
4. Fossen, Thor. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control.// John Wiley & Sons, 2011
5. Johansen, Tor & Fossen, Thor & Vik, Bjornar. (2005). Hardware-in-the-loop Testing of DP systems.
6. E.Ambrosovskaya, P.Opekunov. "Approach for Advanced Testing of DP Control System"MTS DP Conference – Houston October 14-15, 2014
7. DIN EN 62065-2015 Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Track control systems – Operational and performance requirements, methods of testing and required test results (IEC 62065:2014). 2015
8. Ship Theory Handbook. Vol.3. Leningrad, 1985
9. Ambrosovsky V., Ambrosovskaya E. Mathematical models of ship motion at ahead speed for testbenches, Deposited Doc. VINITI 14.06.2018 (N62-B2018) (in Russian).
10. ISO 11674 Ships and marine technology. Heading control systems (2019)
11. Ambrosovsky V., Rumyantsev S. Numerical simulation of nonregular wave disturbance in ship maneuvering motion simulation problems. Manoeuvring and Control of Marine Craft MCMC94, Southampton.
12. Ambrosovsky V., Ambrosovskaya E., Kolpakova I. Measuring channels in monitoring and control systems of technical means. Morskoy Vestnik, 2017, No.4 (64), pp. 93-96

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

Елена Борисовна Амбросовская, кандидат технических наук, доцент кафедры корабельных систем управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" В.И.Ульянова (Ленина), ул.Профессора Попова 5, 197022; ведущий инженер-исследователь АО "Навис", 22 линия д 3, 199106, e-mail: e-ambr@mail.ru

Виктор Михайлович Амбросовский, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры корабельных систем управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" В.И.Ульянова (Ленина), ул.Профессора Попова 5, 197022, e-mail: v-ambr@mail.ru

Дмитрий Владимирович Ромаев, ведущий инженер-исследователь Навис, 22 линия д 3, 199106, e-mail: d.romaev@navis.spb.ru

Elena B. Ambrosovskaya, Ph.D. (Eng), Associate Professor St. Petersburg State Electrotechnical University (LETI), Professora Popova ,5, St. Petersburg, 197022, Russian Federation; Senior Research Engineer of Navis co, St-Peterburg, 199106, 22 liniya d.3 Russian Federation, e-mail: e-ambr@mail.ru

Viktor M. Ambrosovsky, Ph.D. (Eng), Associate Professor St. Petersburg State Electrotechnical University (LETI), Professora Popova ,5, St. Petersburg, 197022, Russian Federation, e-mail: v-ambr@mail.ru

Dmitry V.Romaev, Senior Research Engineer of Navis, St-Peterburg, 199106, 22 liniya d.3 Russian Federation, e-mail: d.romaev@navis.spb.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.07.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.07.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 01.08.2023

Научная статья

УДК 004.896+629.58+001.891.57

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.011>

Алгоритмическое обеспечение работы АНПА подо льдом в приполярных районах

А.В. Багницкий^{1,2} bagn@marine.febras.ru, А.В. Инзарцев^{1,2} inzar@marine.febras.ru, М.А. Панин^{1,2} kars25rus@mail.ru

¹Институт проблем морских технологий им. академика М. Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук, ²Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

Аннотация. В настоящее время множество актуальных задач связано с изучением покрытых льдом приполярных акваторий: мониторинг морских биоресурсов, обследование нижней кромки льда, инспекция объектов подводной инфраструктуры и т. д. Использование для этих целей автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) позволяет экономить значительные материальные и людские ресурсы. Основные проблемы во время движения АНПА при выполнении таких работ доставляют неровная нижняя поверхность льда (включая ледяные кили) и необходимость поиска полыней для всплытия в случае непредвиденной ситуации. В статье рассматриваются алгоритмы работы информационно-управляющей системы АНПА, предназначенные для решения указанных задач. Алгоритмы обеспечивают движение АНПА подо льдом на различных горизонтах, со стабилизацией заданного отстояния от нижней кромки льда (если возможно), а также в покрытых льдом мелководных акваториях. Для избегания столкновений с возможными препятствиями предусмотрены варьируемые приоритеты стабилизации вертикального и горизонтального каналов управления. Для получения информации об окружающей ледовой обстановке используется эхолокационная система, состоящая из нескольких сонаров с фиксированными диаграммами направленности в передней полусфере АНПА. Поиск полыней для всплытия производится на основе данных от ориентированного вверх эхолокатора. Работоспособность алгоритмов подтверждена с применением методов математического моделирования.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА), движение подо льдом, обход препятствий, всплытие в полынь, информационно-управляющая система.

Финансирование: Модельные эксперименты выполнены при поддержке Гранта Российского научного фонда № 22-11-00032, <https://rscf.ru/project/22-11-00032/>

Для цитирования: Багницкий А.В., Инзарцев А.В., Панин А.В. Алгоритмическое обеспечение работы АНПА подо льдом в приполярных районах, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 98—109. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.011

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.011>

Algorithmic support for the AUV operation under ice in the polar regions

Andrey V. Bagnitskii^{1,2} bagn@marine.febras.ru, Alexander V. Inzartsev^{1,2} inzar@marine.febras.ru, Mikhail A. Panin^{1,2} kars25rus@mail.ru

¹Institute of Science M. D. Ageev Institute of Marine Technology Problems Far East Branch Russian Academy of Sciences. ²Institute of Automation and Control Processes Far East Branch Russian Academy of Sciences

Abstract. Currently, many actual tasks are associated with the survey ice-covered circumpolar water areas: monitoring of marine biological resources, inspection of the lower edge of the ice, inspection of underwater infrastructure facilities, etc. The use of autonomous underwater vehicles (AUV) for these purposes allows one to save significant material and human resources. The main problems during the movement of the AUV when performing such work are the uneven lower surface of the ice (including ice keels) and the need for finding ice holes for surfacing in case of an unforeseen situation. The article discusses the algorithms of the AUV information and control system, designed to solve these problems. The algorithms ensure the movement of the AUV under the ice at various horizons, with the stabilization of a given distance from the lower edge of the ice (if possible), as well as in ice-covered shallow waters. To avoid collisions with possible obstacles, variable priorities for stabilization of vertical and horizontal control channels are provided. To obtain information about the surrounding ice conditions, an echolocation system consisting of several sonars with fixed directional patterns in the AUV's anterior hemisphere is used. The search for a ice hole for surfacing is based on data from an upward-oriented sonar. The efficiency of the algorithms has been confirmed using mathematical modeling methods.

Key words: autonomous underwater vehicle (AUV), movement under ice, obstacle avoidance, surfacing in ice hole, information and control system.

Financial Support: Simulation experiments were supported by the Russian Science Foundation (RSF grant no. 22-11-00032, <https://rscf.ru/project/22-11-00032/>)

For citation Andrey V. Bagnitckii, Alexander V. Inzartsev, Mikhail A. Panin Algorithmic support for the AUV operation under ice in the polar regions, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 1, P. 98—109. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.011

Введение

В последние десятилетия всё более активно производится изучение и промышленное освоение приполярных областей, в том числе покрытых льдами Арктических и Антарктических морских акваторий. Спектр решаемых при этом задач весьма обширен и включает как научные (мониторинг морских биоресурсов, океанологические и геологические измерения, сбор данных для оценки влияния приполярных областей на климат и т.п.), так и промышленно-ориентированные (мониторинг водной среды и донной поверхности в районах добычи полезных ископаемых, работы по обслуживанию и инспекции объектов подводных добывающих комплексов).

Задачи построения картин распределения биомассы, проникновения солнечного излучения, пелагического цветения водорослей и фитопланктона для приповерхностного слоя воды весьма актуальны для морской биологии [1, 2]. Особый интерес представляют данные для покрытых льдами приполярных областей, поскольку эта информация необходима для оценки объема планктона и криля, являющегося кормом для многих океанических видов рыб и животных. Задача получения исходных данных для построения подобных карт решается с использованием различного типа буёв, которые вмораживаются в лёд или опускаются под лёд через лунки (обзор используемых технологий можно найти в [1]). В последнее время для этого также активно используют телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА) [3]. Однако, во всех этих случаях работы ограничены окрестностями полыньи или специально подготовленных прорубей.

Альтернативой указанным методам является применение АНПА, которые используются для этих целей сравнительно недавно (подробный обзор использования АНПА приведен в [4]). Аппараты, оснащенные различными датчиками, позволяют строить равномерную сетку покрытия на разных горизонтах, получая исходные данные для 3D-представления о распределении биоресурсов. К преимуществам использования АНПА относится безопасность, возможность заходить далеко под ледовые поля и работать в приповерхностном слое. Однако при работе в приповерхностном слое в ряде случаев проблемы может доставлять неровная нижняя поверхность льда, порой включающая в себя ледяные кили. При этом от АНПА требуется маневрирование с минимальным отклонением от запланированного маршрута.

Следует отметить, что использование АНПА подо льдом также предполагает решение задачи автоматического поиска полыньи для всплытия в случае преждевременного окончания миссии или для выхода на связь с оператором и уточнения своих координат.

Похожие проблемы, связанные с движением подо льдом и поиском полыньи, возникают при использовании АНПА для мониторинга подводных коммуникаций или инспектирования объектов

нефтегазовой инфраструктуры, большую часть года находящейся подо льдом [5, 6]. Особенно это проявляется при использовании АНПА для обследования объектов, находящихся на небольшой глубине [7], когда препятствия для движения могут одновременно возникать как сверху, так и снизу.

Указанные выше проблемы для используемых подо льдом АНПА решаются по-разному. Одно из первых масштабных применений АНПА подо льдом описано в [8]. Для избегания возможных столкновений с подводными объектами аппарат Autosub-2 использовал два ADCP (доплеровские датчики скорости потока воды), направленные вверх и вниз, а также смотрящий вперёд эхолот. Как такового локального маневрирования при обнаружении препятствий предусмотрено не было: при уменьшении дистанции по переднему локатору до 100 м или глубины места меньше 50 м АНПА отходил назад на 1 км и далее пытался продолжить движение в прежнем направлении со смещением 500 м влево или вправо (рис. 1). Поиск полыньи при всплытии предусмотрен не был.

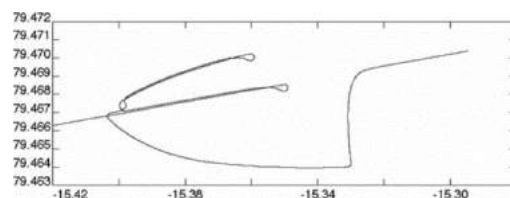


Рис. 1 – Траектория АНПА Autosub-2 при обходе подводной части айсберга [8]

Как правило, АНПА используются в приповерхностном слое для районов с достаточно спокойным рельефом подводной части льда, либо перемещения АНПА осуществляются подо льдом на безопасной большой глубине. Например, АНПА Remus-100 применялся для оценки динамики и происхождения подледного пелагического цветения водорослей и фитопланктона около Шпицбергена [9]. АНПА работал в районе полыньи, через которую осуществлялись запуски. Для возврата в полынью использовалась гидроакустическая навигационная система с ультракороткой базой (УКБ ГАНС). Для работ был выбран район с гладким рельефом нижней кромки льда, поэтому проблем с обходом препятствий не возникло (рис. 2).

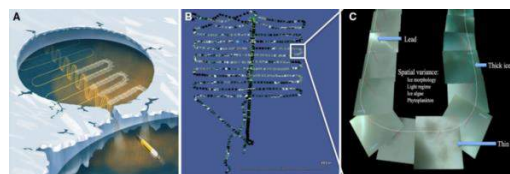


Рис.2 – Типичные траектории движения АНПА подо льдом для оценки плотности биоресурсов и получения картины нижней кромки льда [9]

Следует отметить, что для безопасности многие «подледные» АНПА используются в режиме телеуправления по оптическому кабелю. Пример исследования льда снизу акустическими методами с помощью АНПА Gavia описан в [10]. Аппарат

запускался вблизи полыньи в режиме телеуправления, а все его перемещения контролировались оператором по оптическому кабелю. Подобным образом использовался аппарат Icefin [11].

Проблема поиска полыньи для незапланированных всплытий в публикациях представлена слабо. Как правило, всплытия АНПА осуществляются в полыньях, заранее оснащенных акустическими средствами наведения [8, 12]. Подобную технологию использовал АНПА «Клавесин-1Р» во время подлёдных работ в Арктике [13, 14].

В теоретическом плане задача движения АНПА среди препятствий исследована достаточно подробно. Например, в [15] приведён обзор алгоритмов движения среди известных и неизвестных препятствий, а также одиночное и групповое движение АНПА. Планирование высокоточного и оптимального пространственного движения АНПА исследуется в [16], однако при этом предполагается, что карта препятствий известна заранее. Для оценки формы препятствий в некоторых случаях используется их аппроксимация сплайнами [17]. При этом не акцентируется внимание на вопросах получения исходных данных о препятствиях. Априорно предполагается, что используются источники данных (эхолокационные системы /ЭЛС/, лазерные сканеры и т.п.), дающие идеальную картину дистанций для множества направлений [18, 19].

Между тем, получение актуальных дистанций до препятствий представляет значительную проблему. Полученные в толще воды данные ЭЛС зашумлены, имеются также ложные дистанции. Во многих случаях на АНПА размещаются только несколько сонаров с фиксированными диаграммами направленности, поскольку многолучевые ЭЛС имеют гораздо большие габариты, энергопотребление, а также стоимость. Также в приведенных работах рассматриваются только «плоское» движение АНПА среди выпуклых препятствий. Между тем задача движения подо льдом ставится гораздо шире. Во многих случаях препятствие не имеет строго выпуклой формы и требуется маневрирование АНПА в двух плоскостях. Возможны также случаи встречи АНПА с препятствиями типа «пещера», которые могут образовываться в подводных частях айсбергов.

Далее в работе рассматриваются алгоритмы работы системы управления, обеспечивающие движение подо льдом и поиск полыньи для АНПА. В качестве объекта для реализации алгоритмов рассматривается информационно-управляющая система (ИУС) АНПА ММТ-3500 (рис. 3а), который неоднократно применялся для получения данных о состоянии глубоководных экосистем в Антарктике [20, 21]. АНПА оснащён ЭЛС, позволяющей определять расстояние до препятствий по девяти направлениям в горизонтальной и вертикальной плоскостях в передней полусфере, как показано на рисунке 3б).

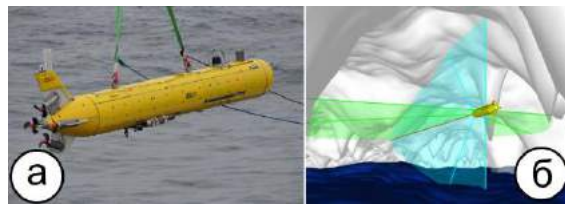


Рис. 3 – АНПА ММТ-3500: а) внешний вид; б) области видимости ЭЛС, состоящей из 9 лучей

1. Постановка задачи движения подо льдом

Целью запуска АНПА подо льдом является его безопасное движение по заданному маршруту с выполнением съёмки заданных участков акватории. При этом, в зависимости от цели запуска, для обеспечения безопасности аппарата маневрирование может осуществляться в горизонтальной или вертикальной плоскостях, либо в обеих плоскостях одновременно. Поведение аппарата может выбираться на этапе планирования миссии, основываясь на описании цели работы, а также на известном описании рабочей среды вокруг аппарата. Таким образом, можно выделить следующие задачи, которые необходимо решить для организации движения АНПА подо льдом.

1) Обнаружение и обход препятствий, таких как выступы нижней кромки льда, горы или искусственные объекты, минимизация риска столкновения с ними. После исчезновения угрозы столкновения должен выполняться возврат АНПА к заданному маршруту. В одних ситуациях способ маневрирования АНПА определяется однозначно, в других у аппарата есть выбор, принятие решение по которому является следующей задачей.

2) Движение по маршруту с разной приоритетностью каналов управления. Оператор должен иметь возможность задать, какой канал (горизонтальный или вертикальный) используется для манёвров АНПА при уклонении от препятствий, а какой является основным, используемым для съёмки. Для некоторых миссий (например, при выполнении биологического мониторинга) требуется, чтобы АНПА двигался на постоянной глубине, обходя препятствия, по возможности, по курсу. Для других миссий (например, при патрулировании) требуется, чтобы АНПА не отклонялся от заданного курса и строго проходил заданные путевые точки, маневрируя, при необходимости, по вертикали. В первом случае в качестве приоритетного канала выбирается курс, во втором – глубина.

3) Выбор безопасных параметров движения, обеспечивающих наилучшие условия для работы бортового оборудования АНПА. Для минимизации негативного влияния колебаний по дифференту на показания ЭЛС, гидролокаторов и другого оборудования приоритетным является движение в режиме стабилизации заданной глубины с указанием минимально допустимых дистанций до препятствий сверху/снизу, слева/справа. При выходе дистанций за указанные допуски АНПА переключается на эквидистантное управление [22] либо выполняет манёвры, обеспечивающие безопасность.

4) В случае необходимости, поиск области (полыньи) для всплытия и удержание в ней аппарата.

2. Разрабатываемые алгоритмы в составе ИУС АНПА ММТ-3500

Информационно-управляющая система АНПА типа ММТ-3500 представляет собой комплекс взаимодействующих программных модулей, совместное функционирование которых обеспечивает выполнение роботом введённой программы-задания (миссии). В зависимости от своих функций модули ИУС включены в один из трёх уровней управления: оперативный, тактический и стратегический [23]. Модули оперативного уровня оперируют и обобщают навигационные данные, а также осуществляют регулирование заданных параметров движения АНПА. Модули этого уровня взаимодействуют с драйвером устройств, которые непосредственно управляют бортовым оборудованием АНПА. На тактическом уровне модули задают поведение аппарата для каждой из подзадач миссии. На стратегическом уровне определяется состав задач и параметры выполнения всей миссии аппарата в целом; в составлении миссии участвует оператор. Подмножество модулей и сообщений ИУС, которые используются при реализации описываемых далее алгоритмов, приведено на рисунке 4.

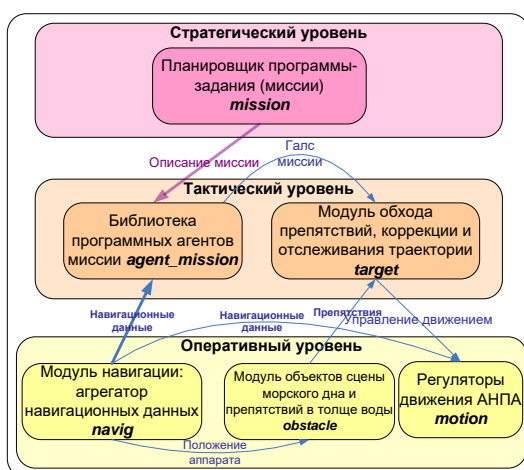


Рис. 4 – Используемые модули и сообщения ИУС

Миссия АНПА определяется на стратегическом уровне как кусочно-линейная траектория, в узлах которой находятся начальные и конечные точки галсов. Заданные параметры движения и режимы работы оборудования в пределах каждого галса постоянны, но при этом они могут варьироваться для каждого отдельного галса.

Представленные в работе алгоритмы обхода препятствий и поиска полыньи реализуются на тактическом уровне, поскольку оперируют тактическими данными: маршрутными точками, галсами, режимами движения и т.д. Алгоритмы осуществляют управление движением АНПА посредством регуляторов оперативного уровня, которые обеспечивают достижение заданных величин курса, глубины, скорости (включая нулевую

скорость, т.е. зависание). Организация и принципы работы регуляторов движения в рамках данной работы не рассматриваются.

3. Алгоритмы движения подо льдом

При движении АНПА подо льдом ЭЛС выдаёт набор трёхмерных точек (контактов), определяющих расположение препятствий вокруг аппарата. Алгоритм обхода препятствий должен проверять близость контактов к АНПА и накладывать ограничения на манёвры аппарата. Множество ситуаций, в которые может попасть аппарат при работе с полученными контактами ЭЛС, можно упростить до бинарных случаев наличия/отсутствия препятствий впереди, слева, справа, сверху и снизу (т.е. 5 логических переменных). Указанные логические переменные определяют таблицу истинности с 32-мя состояниями, в каждой из которых аппарат должен вести себя определённым образом. Например, если контакт, полученный от ЭЛС, находится справа от АНПА на дистанции, не превышающей длины корпуса аппарата, («близкий контакт») то при повороте АНПА направо высок риск столкновения: манёвр вправо использоваться не должен. Контакты могут возникать с нескольких сторон сразу, как по вертикали, так и по горизонтали. Близкий контакт впереди детектируется, если неизбежно столкновение АНПА при условии сохранения текущей скорости и направления движения.

Оценка безопасности для возможных курсов или глубин движения АНПА выполняется посредством оценки размеров областей обзора ЭЛС в вертикальной и горизонтальной плоскостях (на рисунке 3б) эти области показаны голубым и зелёным цветами соответственно). Ввиду ограниченного количества лучей граница области сглаживается с применением сплайнов Эрмита.

При выборе возможных вариантов движения учитывается, что АНПА может реагировать на эти ситуации с использованием 3-х каналов управления, поддерживаемых регуляторами оперативного уровня ИУС:

- горизонтального (вращение по курсу);
- вертикального (поступательное движение в вертикальном направлении и вращательное по дифференту);
- продольного (управление скоростью).

При возникновении ситуации с допустимым вариативным поведением (например, «Стена впереди») в зависимости от заданного приоритета стабилизации горизонтального или вертикального каналов аппарат может выполнять либо горизонтальный, либо вертикальный обходной манёвр.

Ниже в таблицах 1 и 2 обобщены возможные реакции АНПА по указанным каналам в различных ситуациях. В таблице 1 показаны возможные реакции АНПА управления для случая отсутствия близких контактов впереди. Аналогичные ситуации при наличии близких контактов спереди показаны в таблице 2.

Таблица 1

Управление АНПА при отсутствии близких контактов впереди.

По горизонтали	Нет близких контактов по горизонтали	Бликие контакты с одной стороны по горизонтали	Бликие контакты слева и справа
По вертикали			
Нет близких контактов по вертикали	Ситуация: «Препятствия далеко» Скорость: целевая. Курс: целевой. Глубина: целевая.	Ситуация: «Стена сбоку» Скорость: снижается. Курс: горизонтальная эквидистанта. Глубина: целевая.	Ситуация: «Узость» Скорость: снижается. Курс: середина между препятствиями. Глубина: целевая.
Бликие контакты с одной стороны по вертикали	Ситуация: «Перепад высот» Скорость: целевая. Курс: целевой. Глубина: вертикальная эквидистанта.	Ситуация: «Стена сбоку + перепад высот» Скорость: снижается. Курс: горизонтальная эквидистанта. Глубина: вертикальная эквидистанта.	Ситуация: «Узость + перепад высот» Скорость: снижается. Курс: середина между препятствиями. Глубина: вертикальная эквидистанта.
Бликие контакты сверху и снизу	Ситуация: «Мель» (вертикальная узость) Скорость: снижается. Курс: поворот в сторону прохода (увеличения глубины места). Глубина: середина между препятствиями.	Ситуация: «Берег сбоку» Скорость: снижается. Курс: поворот в сторону прохода (увеличения глубины места). Глубина: середина между препятствиями.	Ситуация: «Тоннель» Скорость: задний ход Курс: фиксированный текущий Глубина: середина между препятствиями.

Таблица 2

Управление АНПА при наличии близких контактов впереди.

По горизонтали	Бликие контакты по горизонтали отсутствуют либо имеются с одной стороны	Бликие контакты слева и справа
По вертикали		
Бликие контакты по вертикали отсутствуют либо имеются с одной стороны	Ситуация: «Стена впереди» Скорость: остановка. Курс/глубина: в зависимости от заданного приоритета горизонтального или вертикального канала выполняется поиск прохода и движения к нему (при неудаче подключается второй канал).	Ситуация: «Тупик» Скорость: остановка. Курс: фиксированный текущий Глубина: изменение до обнаружения прохода. Если прохода нет, то задний ход.
Бликие контакты сверху и снизу	Ситуация: «Берег впереди» Скорость: остановка. Курс: поворот в сторону прохода (увеличения глубины места). Глубина: середина между препятствиями.	Ситуация: «В ловушке» Скорость: остановка / задний ход попеременно. Курс: фиксированный текущий. Глубина: середина между препятствиями.

Для стабилизации расстояний до препятствий при их обходе используются модели поведения АНПА, а также регуляторы по соответствующим каналам, описанные в [22]. Допустимые дистанции для разных направлений задаются оператором при составлении миссии. Если минимальное значение среди всех дистанций до контактов меньше критического значения (близкого к значению мёртвой зоны ЭЛС), то вместо действий из таблицы 1 выполняются

действия для аналогичной ситуации из таблицы 2, т.е. более осторожные реакции. В экстренных случаях используется реверсивное движение АНПА с фиксацией текущего курса.

Обобщённая блок-схема алгоритма обхода препятствий в пределах выполнения одного галса миссии показана на рисунке 5. Блок коррекции целевых значений, помещённый внизу блок-схемы, приведён в таблицах 1 и 2.

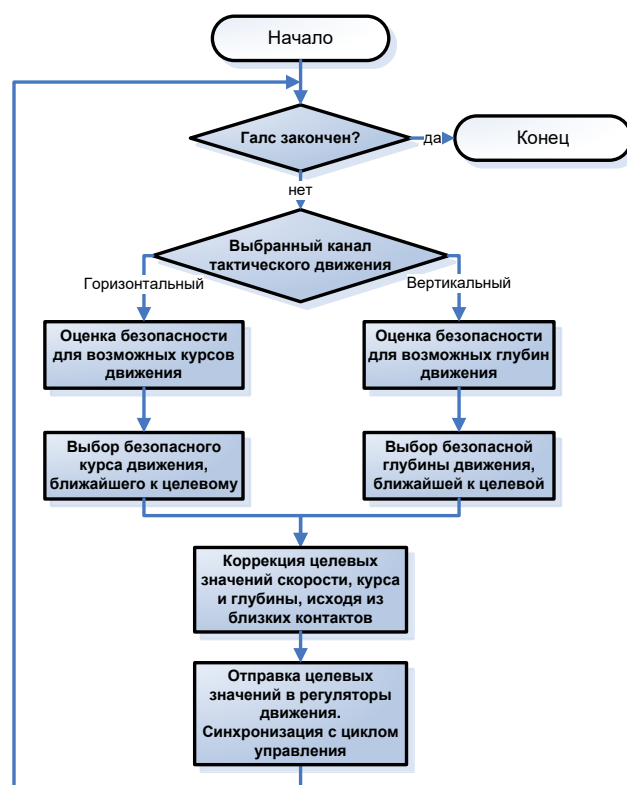


Рис. 5 – Обобщённая блок-схема алгоритма обхода препятствий

4. Всплытие среди льдов

Необходимость всплытия АНПА в полынье с заранее неизвестными координатами может возникнуть в следующих случаях:

- 1) если АНПА должен выйти на сеанс связи с постом оператора (для получения новых инструкций, выгрузки данных и т.п.);
- 2) при необходимости коррекции накопившейся ошибки бортовой навигационной системы средствами GPS/GLONASS;
- 3) при возникновении на борту аварийной ситуации.

Предполагается, что АНПА должен искать полынья в фоновом режиме, двигаясь подо льдом на постоянной глубине. С целью минимизации риска утраты АНПА поиск полыньи осуществляется вдоль запланированного маршрута. Поиск подходящих для всплытия мест осуществляется на основе данных от сонара, направленного вверх (эхолотера). После того, как полынья найдена, нужно убедиться в том, что её размеры гарантируют безопасное всплытие в ней. Как упоминалось выше, эти действия должны выполняться алгоритмом, реализованном на тактическом уровне ИУС АНПА (рис. 4). Введём основные понятия, используемые алгоритмом.

- «Областью безопасности» является пространство чистой воды (безо льда), ограниченное окружностью с диаметром D более, чем четыре длины корпуса аппарата [24] (например, для аппарата длиной 3 м будет производиться поиск чистого пространства диаметром не менее 12 м).

- «Аппроксимированная площадь» – количество клеток со стороной 1 м, вписанные в область безопасности и аппроксимирующие её.

- Точки с признаками «вода» и «лёд» являются замераами толщины льда эхолотом над аппаратом в географических координатах. Точки с признаком «вода» отличаются от точек с признаком «лёд» тем, что толщина льда в них не превышает 5 см и они пригодны для всплытия АНПА. Точки с признаком «вода» имеют признак «Имеет уточняющий галс» и координаты этого галса, а также перечисляемый тип «Пригодность точки (для всплытия)». Массивы этих точек, пополняемых во время работы АНПА, располагаются в циклических буферах.

- «Уточняющий галс» проходит перпендикулярно основному направлению движения АНПА и используется для оценки ширины полыньи-претендента. Длина галса устанавливается равной $1.25 \times D$, что позволяет избежать проведения повторных обследовательских галсов в крупных полыньях.

- Пригодность точки (для всплытия) – перечисляемый тип, хранящийся в каждой точке с признаком «вода». Тип может принимать значения «Непригодна», «Требуется дообследование» и «Пригодна к всплытию». Изначально все точки считаются непригодными к всплытию.

- Логические признаки «Задана точка всплытия» и «Задан уточняющий галс» принимают значения «истина» или «ложь» (при инициализации алгоритма все они имеют значение "ложь").

Обобщённая блок-схема алгоритма поиска и проверки пригодности полыньи для всплытия показана на рисунке 6:

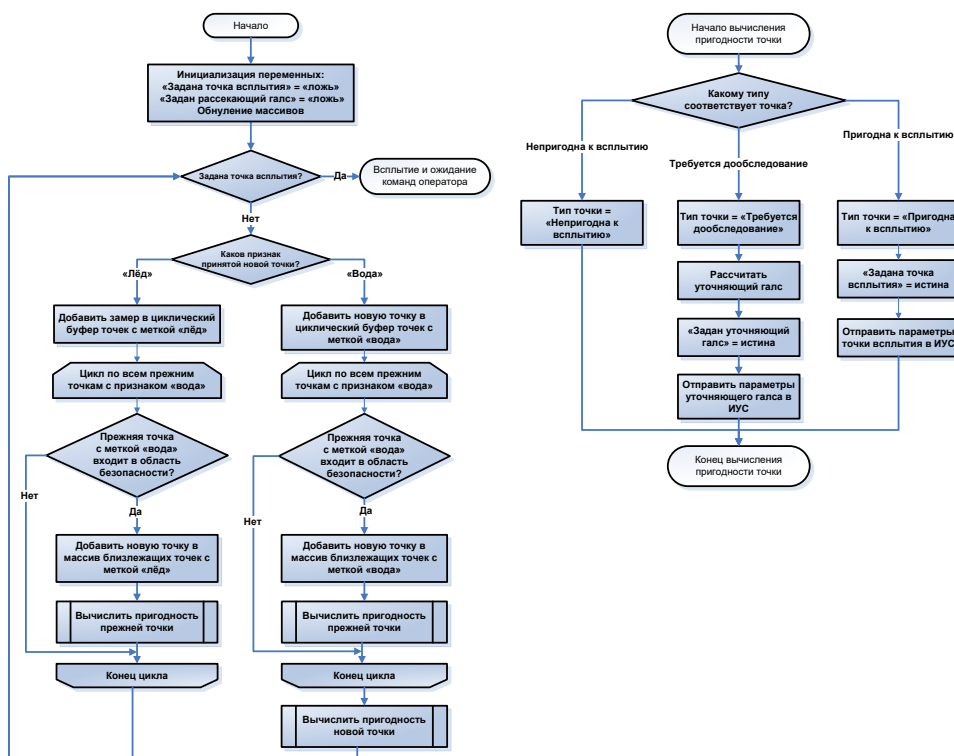


Рис. 6 – Блок-схема алгоритма поиска полыньи для АНПА

Остановимся более подробно на основных моментах представленного алгоритма.

1) Поступающие от эхоледомера показания преобразуются в точки с признаками «вода» или «лёд» и помещаются в соответствующие циклические буферы.

2) Для каждой новой точки производится поиск всех близлежащих к ней точек с признаком «вода» и «лёд». Для этого вычисляется расстояние до этих точек и сравнивается с размером $D/2$. Близлежащие точки запоминаются в специальных массивах.

3) После завершения поиска близлежащих точек для каждой новой точки, а также при любом дополнении уже записанной точки с признаком «вода» производится вычисление пригодности этой точки, а также близлежащих к ней точек в «области безопасности», для всплытия/дообследования. Пригодность может иметь одно из трёх значений:

а) «Непригодна». Условия его наступления таковы: если в «области безопасности» есть хотя бы одна точка с признаком «лёд».

б) «Требуется дообследование». Условия его наступления таковы: если «аппроксимированная площадь» больше или равна D и признаки «Задан уточняющий галс» и «Задана точка всплытия» равны «ложь», то для данной точки рассчитывается уточняющий галс (его угловая ориентация задаётся как перпендикуляр к отрезку между проверяемой точки и самой удалённой от неё точки с меткой «вода» или как перпендикуляр к текущему курсу аппарата). Признак «Задан уточняющий галс» устанавливается равным «истина»; признак самой точки «Имеет уточняющий галс» устанавливается равным «истина», а тип становится равным «Требуется дообследование». Уточняющий галс передаётся на исполнительный уровень ИУС. После

прохождения уточняющего галса признак «Задан уточняющий галс» устанавливается равным «ложь».

в) «Пригодна к всплытию»: если аппроксимированная площадь больше $2 \times D$, и признак «Задана точка всплытия» равен «ложь», и признак точки «Имеет уточняющий галс» равен «истина», то считается, что полынья найдена, о чём сообщается в ИУС. Тип точки устанавливается как «Пригодна к всплытию», а признак «Задана точка всплытия» меняется на «истина».

Таким образом, циклическое выполнение основного цикла алгоритма приводит к тому, что аппарат или всплывает в обнаруженной полынье, или дообследует найденную область, или следует по миссии, накапливая в буфере достаточное количество точек с признаком «вода».

Оptionальными для данного алгоритма являются вычисление MBR (minimal bounding rectangle) вокруг «аппроксимированной площади», вычисление более выгодной полыньи и увеличение количества уточняющих галсов с одного до двух и более. MBR позволит отсеивать ложноположительные срабатывания алгоритма в тех случаях, когда аппарат претерпевает сбой системы управления (например, из-за поломки двигателя, зацепления за сеть и т.п.) и совершает хаотичные перемещения в малой области, ограниченной несколькими длинами аппарата.

Более предпочтительная полынья может встречаться при обследовании аппаратом большой полыньи: пока аппарат выполняет уточняющий галс, алгоритм обнаруживает большие кластеры точек с признаком «вода», и переходит на новый уточняющий галс для новой области безопасности. Такое поведение достижимо за счёт дополнительного учёта кластеров точек, примыкающих к «области безопасности». Среди

нескольких точек наиболее предпочтительными должны считаться те, у которых кластеров больше и у которых кластеры занимают большую площадь, располагаясь при этом с противоположных сторон от округлой «области безопасности». Предпочтительность может быть вычислена как длина и наклон трёхмерного «вектора предпочтительности»: его длина зависит от «аппроксимированной площади» кластеров, а наклон – от их взаимного расположения относительно проверяемой точки. Из двух подобных векторов предпочтительным считается тот, длина которого больше, а наклон – меньше.

5. Моделирование обхода препятствий, поиска полыньи и всплытия

Эксперименты с обходом препятствий, поиском полыньи и всплытием производились с использованием моделирующего комплекса, сопряженного с ИУС реального АНПА [25]. Фрагмент используемого для отладки виртуального 3D-полигона приведён на рисунке 7. На рисунке изображены: дно (синий цвет), нижняя кромка льда (серый полупрозрачный цвет), заданный маршрут АНПА (штрихпунктирная лиловая линия), результирующая траектория АНПА (сплошная оранжевая линия), белые и голубые точки замеров эхолотомера с признаками «лёд» и «вода» соответственно.

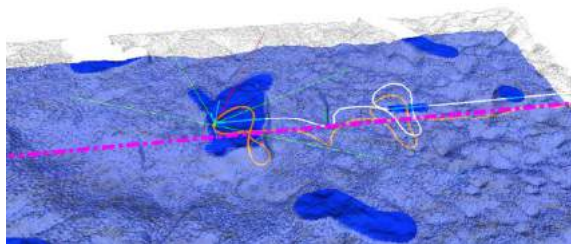


Рис. 7 – Виртуальный полигон для отладки обхода препятствий, поиска полыньи и всплытия в ней

Нижняя кромка льда представляет собой неровную поверхность с произвольно расположенными вертикальными киями, уходящими на глубину до 20 метров и создающими препятствия для аппарата. Дно располагается на глубине в среднем 30 метров и имеет холмистый рельеф. На полигоне также имеются произвольно расположенные полыньи разных форм и размеров.

Миссия АНПА заключалась в следующем:

- пройти по указанному маршруту на заданной глубине 10 м, уклоняясь от препятствий с равным приоритетом по вертикальному и горизонтальному каналам, а также выполняя поиск подходящей полыньи (D полыньи для всплытия был задан 20 м);
- остановится и всплыть в центре найденной подходящей полыньи.

По ходу движения аппарата имели место ситуации, показанные на рисунке 8 числами 1-4:

- 1) прохождение полыньи неподходящего для всплытия продольного размера.
- 2) прохождение полыньи с подходящим продольным, но малым поперечным размерами.
- 3) обход ледяного кия с использованием манёвров по глубине и по курсу.
- 4) обнаружение полыньи с подходящими размерами и всплытие в ней.

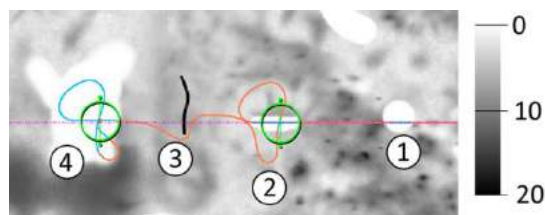


Рис. 8 – Траектория аппарата на фоне карты толщины льда (шкала толщины льда приведена справа)

В ходе эксперимента аппарат успешно обходил многочисленные препятствия, используя как вертикальные, так и горизонтальные манёвры. График изменения глубины аппарата и дистанций ЭЛС на протяжении миссии показан на рисунке 9. Наибольшие глубины на рисунке соответствуют обходу аппаратом значительных по размерам препятствий. Такие маневры вызваны появлением минимальных дистанций по горизонтальным каналам ЭЛС. На рисунке голубая область обозначает время прохождения аппарата под полыньей. В таких областях показания эхолотомера совпадают с глубиной движения АНПА. Красными областями обозначены интервалы движения аппарата подо льдом во время уточняющих галсов. Жёлтая область обозначает прохождение глубокого кия 3. На рисунке также обозначены проходы аппарата под полыньями № 1, 2 и 4.

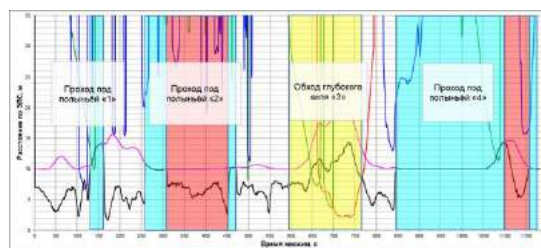


Рис. 9 – Графики глубин и дистанций по ЭЛС аппарата во время миссии (синий график – дистанция по левому локатору ЭЛС, красный – дистанция по правому локатору ЭЛС, зелёный – дистанция по переднему локатору ЭЛС, чёрный – дистанция по эхолотомеру, лиловый – глубина движения аппарата.)

На рисунке 10 укрупненно показан момент обхода аппаратом ледяного кия слева с изменением глубины и курса.

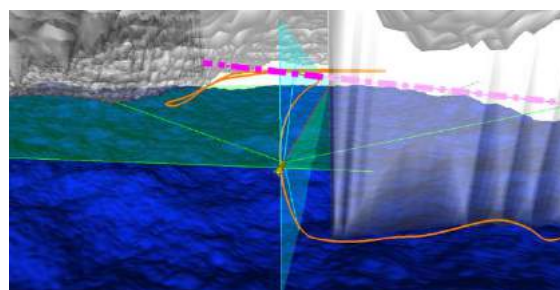


Рис. 10 – Обход ледяного кия сбоку (нижняя кромка льда обозначена серым цветом, донная поверхность – синим цветом)

Дойдя до полыньи 4, аппарат обследовал её по всей длине, после чего выполнил дополнительный галс для уточнения ширины полыньи. По завершении

этого галса АНПА остановился и всплыл в середине обследованного свободного пространства, как показано на рисунке 8.

Заключение

В настоящей работе представлены алгоритмы, обеспечивающие работу АНПА под нижней кромкой льда: обход препятствий и поиск полыньи, подходящей для всплытия. Работоспособность алгоритмов проверялась с использованием моделирующего комплекса на виртуальном 3D-полигоне. Алгоритмы ориентированы на использование в ИУС АНПА ММТ-3500, что позволит значительно расширить область использования аппарата при работах в высоких широтах.

В будущих работах планируется повысить универсальность разработанных алгоритмов путём адаптации их для других конфигураций ЭЛС, а также для условий дрейфующего льда и опасных узких проходов на пути аппарата, таких как пещеры внутри айсбергов. Важной задачей является проверка отсутствия заклинивания в процессе движения, для которой потребуется рассмотреть не только основные ситуации, но и все возможные переходы между ними. Также возможна модернизация алгоритма поиска полыньи для его большей защищённости от сбояв навигационной системы аппарата и большей гибкости при обследовании крупной полыньи, кратно большей "области безопасности".

Литература

1. Lucieer V.L., Forrest A.L. Emerging Mapping Techniques for Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) / Seafloor Mapping along Continental Shelves. Research and Techniques for Visualizing Benthic Environments. Coastal Research Library. Springer, Cham. 2016, vol. 13. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25121-9_2
2. Cimoli, Emiliano & Meiners, Klaus & Lund-Hansen, Lars & Lucieer, Vanessa. Spatial variability in sea-ice algal biomass: an under-ice remote sensing perspective. // *Advances in Polar Science*. 2017. Vol. 28, No. 4., pp. 268-296. <https://doi.org/10.13679/j.advps.2017.4.00268>.
3. Lund-Hansen L.C., Sogaard D.H., Sorrell B.K., Gradinger R., Meiners K.M. Methods and Techniques in Sea Ice Ecology. / *Arctic Sea Ice Ecology*. Springer Polar Sciences. Springer, Cham. 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37472-3_6
4. Zeng J B, Li S, Liu Y. Application of unmanned underwater vehicles in polar research // *Advances in Polar Science*. 2021, Vol. 32, No. 3: pp. 173-184, <https://doi.org/10.13679/j.advps.2021.0018>
5. Косарева Ю.В., Бесхижко В.В., Симакова С.В., Чесноков А.А., Толочкин О.Ю. Подводные добычные комплексы как перспективный тренд в освоении арктических месторождений и некоторые вопросы их электроснабжения // *Neftegaz.RU*, 2019, № 11(95), С. 26-34
6. Инзарцев А.В., Панин М.А., Бобков В.А. Алгоритмы инспекции локальных объектов донного промышленного оборудования с применением АНПА // *Подводные исследования и робототехника*, № 3(33), 2020, С. 18-30. DOI: 10.37102/24094609.2020.33.3.003
7. Месторождение «Сахалин-3» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gazprom.ru/projects/sakhalin3/> (дата обращения 21.10.2022)
8. Dowdeswell, J., Evans, J., Mugford, R., Griffiths, G., McPhail, S., Millard, N., Ackley, S. Autonomous underwater vehicles (AUVs) and investigations of the ice–ocean interface in Antarctic and Arctic waters // *Journal of Glaciology*, 2008, 54(187), pp. 661-672. doi:10.3189/002214308786570773
9. Johnsen, G., Norli, M., Moline, M. et al. The advective origin of an under-ice spring bloom in the Arctic Ocean using multiple observational platforms // *Polar Biology*, 2018, Vol. 41, 1197–1216, <https://doi.org/10.1007/s00300-018-2278-5>
10. Vanessa Lucieer, Amy W. Nau, Alexander L. Forrest and Ian Hawes. Fine-Scale Sea Ice Structure Characterized Using Underwater Acoustic Methods // *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, Issue 10, 821; <https://doi.org/10.3390/rs8100821>
11. Spears A, West M, Meister M, et al. Under ice in Antarctica: the Icefin unmanned underwater vehicle development and deployment // *IEEE Robotics Automation Magazine*, 2016, 23(4): 30-41, doi:10.1109/MRA.2016.2578858
12. Kaminski C, Crees T, Ferguson J, et al. 12 days under ice – an historic AUV deployment in the Canadian High Arctic. / 2010 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles. September 1–3, 2010, Monterey, CA, USA. IEEE, 1-11, doi:10.1109/AUV.2010.5779651.
13. Инзарцев А.В., Каморный А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // *Подводные исследования и робототехника*, № 2(4), 2007, С. 5-14.
14. Павин А.М. Автоматическое приведение автономного подводного робота к гидроакустическому маяку // *Подводные исследования и робототехника*, № 1(5), 2008, С. 32-38.
15. Panda, M., Das, B., Subudhi, B. et al. A Comprehensive Review of Path Planning Algorithms for Autonomous Underwater Vehicles // *International Journal of Automation and Computing*, 2020, Vol. 17, pp. 321–352. <https://doi.org/10.1007/s11633-019-1204-9>
16. Wang, X., Yao, X. & Zhang, L. Path Planning under Constraints and Path Following Control of Autonomous Underwater Vehicle with Dynamical Uncertainties and Wave Disturbances // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2020, 99:891–908. <https://doi.org/10.1007/s10846-019-01146-3>
17. Filaretov V., Yukhimets D. The method of formation of AUV smooth trajectory in unknown environment // *Proceedings of 2016 OCEANS - MTS/IEEE Conference & Exhibition, Shanghai, China, 10-13 April, 2016*, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1109/OCEANSAP.2016.7485655>
18. Yao X, Wang X, Wang F, Zhang L. Path Following Based on Waypoints and Real-Time Obstacle Avoidance Control of an Autonomous Underwater Vehicle // *Sensors*. 2020; 20(3):795. <https://doi.org/10.3390/s20030795>

19. Yan Z, Li J, Wu Y, Zhang G. A Real-Time Path Planning Algorithm for AUV in Unknown Underwater Environment Based on Combining PSO and Waypoint Guidance // *Sensors*. 2018. 19(1):20. <https://doi.org/10.3390/s19010020>
20. Бабаев Р.А., Боровик А.И., Ваулин Ю.В., Елисеенко Г.Д., Михайлов Д.Н., Найдено Н.А. Применение АНПА ММТ-3500 для научных исследований в Атлантическом секторе Антарктики // *Подводные исследования и робототехника*. 2022. № 3(41). С. 15–32. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_41_03_02
21. Borovik A.I., Rybakova E.I., Galkin S.V., Mikhailov D.N., Konoplin A.Yu. Experience of Using the Autonomous Underwater Vehicle MMT-3000 for Research on Benthic Communities in Antarctica // *Oceanology*. 2022. Vol. 62. P. 709–720. DOI: 10.1134/S0001437022050034
22. Инзарцев А.В., Багницкий А.В. Планирование и реализация траекторий движения автономного подводного робота при выполнении мониторинга в акваториях различных типов // *Подводные исследования и робототехника*, № 2(22), 2016, С. 25-35
23. Борейко А.А., Инзарцев А.В., Машошин А.И., Павин А.М., Пашкевич И.В. Система управления АНПА большой автономности на базе мультиагентного подхода // *Подводные исследования и робототехника*, № 2(28), 2019, С. 23-31 DOI: 10.25808/24094609.2019.28.2.003
24. Лаптев К.З., Багницкий А.В. Задача для АНПА дальнего радиуса действия по поиску полыней при плавании в арктических районах // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2019. – № 1 (203). – С. 28-38. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-1-28-38
25. Инзарцев А.В., Елисеенко Г.Д., Панин М.А., Павин А.М., Бобков В.А. Морозов М.А. Отладка алгоритмов инспекции подводных трубопроводов на борту АНПА с помощью удаленного высокопроизводительного моделирующего комплекса // *Подводные исследования и робототехника*, № 2(26), 2018, С. 28-36. DOI: 10.25808/24094609.2018.26.2.004

References

1. Lucieer V.L., Forrest A.L. Emerging Mapping Techniques for Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) / *Seafloor Mapping along Continental Shelves. Research and Techniques for Visualizing Benthic Environments*. Coastal Research Library. Springer, Cham. 2016, vol. 13. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25121-9_2
2. Cimoli, Emiliano & Meiners, Klaus & Lund-Hansen, Lars & Lucieer, Vanessa. Spatial variability in sea-ice algal biomass: an under-ice remote sensing perspective. // *Advances in Polar Science*. 2017. Vol. 28, No. 4., pp. 268-296. <https://doi.org/10.13679/j.advps.2017.4.00268>.
3. Lund-Hansen L.C., Søgaard D.H., Sorrell B.K., Gradinger R., Meiners K.M. *Methods and Techniques in Sea Ice Ecology. / Arctic Sea Ice Ecology*. Springer Polar Sciences. Springer, Cham. 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37472-3_6
4. Zeng J B, Li S, Liu Y. Application of unmanned underwater vehicles in polar research // *Advances in Polar Science*. 2021, Vol. 32, No. 3: pp. 173-184, <https://doi.org/10.13679/j.advps.2021.0018>
5. Kosareva Ju.V., Beshizhko V.V., Simakova S.V., Chesnokov A.A., Tolochkin O.Ju. Podvodnye dobychnye komplekсы kak perspektivnyj trend v osvoenii arkticheskikh mestorozhdenij i nekotorye voprosy ih jelektrosnabzhenija [Underwater mining complexes as a promising trend in the development of Arctic deposits and some issues of their power supply]; *Neftegaz.RU*, 2019, № 11(95), pp. 26-34
6. Inzarcev A.V., Panin M.A., Bobkov V.A. Algoritmy inspekcii lokal'nyh ob'ektov donnogo promyshlennogo oborudovanija s primeneniem ANPA; [ALGORITHMS OF SEAFLOOR INDUSTRIAL MACHINERY INSPECTION USING AUV]; *Podvodnye issledovanija i robototehnika*, № 3(33), 2020, pp. 18-30. DOI: 10.37102/24094609.2020.33.3.003
7. Mestorozhdenie «Sahalin-3» [Deposit "Sakhalin-3"]. URL: <https://www.gazprom.ru/projects/sakhalin3/> (date of access 21.10.2022)
8. Dowdeswell, J., Evans, J., Mugford, R., Griffiths, G., McPhail, S., Millard, N., Ackley, S. Autonomous under-water vehicles (AUVs) and investigations of the ice–ocean interface in Antarctic and Arctic waters // *Journal of Glaciology*, 2008, 54(187), pp. 661-672. doi:10.3189/002214308786570773
9. Johnsen, G., Norli, M., Moline, M. et al. The advective origin of an under-ice spring bloom in the Arctic Ocean using multiple observational platforms // *Polar Biology*, 2018, Vol. 41, 1197–1216, <https://doi.org/10.1007/s00300-018-2278-5>
10. Vanessa Lucieer, Amy W. Nau, Alexander L. Forrest and Ian Hawes. Fine-Scale Sea Ice Structure Characterized Using Underwater Acoustic Methods // *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, Issue 10, 821; <https://doi.org/10.3390/rs8100821>
11. Spears A, West M, Meister M, et al. Under ice in Antarctica: the Icefin unmanned underwater vehicle development and deployment // *IEEE Robotics Automation Magazine*, 2016, 23(4): 30-41, doi:10.1109/MRA.2016.2578858
12. Kaminski C, Crees T, Ferguson J, et al. 12 days under ice – an historic AUV deployment in the Canadian High Arctic. / 2010 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles. September 1–3, 2010, Monterey, CA, USA. IEEE, 1-11, doi:10.1109/AUV.2010.5779651.
13. Inzarcev A.V., Kamornyj A.V., L'vov O.Ju., Matvienko Ju.V., Rylov N.I. Primenenie avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata dlja nauchnyh issledovanij v Arktike; [Applying of an autonomous underwater vehicle to scientific research in the Arctic] *Podvodnye issledovanija i robototehnika*, № 2(4), 2007, pp. 5-14.
14. Pavin A.M. Avtomaticheskoe privedenie avtonomnogo podvodnogo robota k gidroakusticheskomu majaku; [Automatic AUV guiding to hydroacoustic beacon] *Podvodnye issledovanija i robototehnika*, № 1(5), 2008, pp. 32-38.
15. Panda, M., Das, B., Subudhi, B. et al. A Comprehensive Review of Path Planning Algorithms for Autonomous Underwater Vehicles // *International Journal of Automation and Computing*, 2020, Vol. 17, pp. 321–352. <https://doi.org/10.1007/s11633-019-1204-9>

16. Wang, X., Yao, X. & Zhang, L. Path Planning under Constraints and Path Following Control of Autonomous Underwater Vehicle with Dynamical Uncertainties and Wave Disturbances // Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2020, 99:891–908. <https://doi.org/10.1007/s10846-019-01146-3>
17. Filaretov V., Yukhimets D. The method of formation of AUV smooth trajectory in unknown environment // Proceedings of 2016 OCEANS - MTS/IEEE Conference & Exhibition, Shanghai, China, 10-13 April, 2016, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1109/OCEANSAP.2016.7485655>
18. Yao X, Wang X, Wang F, Zhang L. Path Following Based on Waypoints and Real-Time Obstacle Avoidance Control of an Autonomous Underwater Vehicle // Sensors. 2020; 20(3):795. <https://doi.org/10.3390/s20030795>
19. Yan Z, Li J, Wu Y, Zhang G. A Real-Time Path Planning Algorithm for AUV in Unknown Underwater Environment Based on Combining PSO and Waypoint Guidance // Sensors. 2018. 19(1):20. <https://doi.org/10.3390/s19010020>
20. Babaev R.A., Borovik A.I., Vaulin Ju.V., Eliseenko G.D., Mihajlov D.N., Najdenko N.A. Primenenie ANPA MMT-3500 dlja nauchnyh issledovaniy v Atlanticheskom sektore Antarktiki; [Application of AUV MMT-3500 for scientific research in the atlantic sector of the antarctic] Podvodnye issledovaniya i robototehnika. 2022. № 3(41). pp. 15–32. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_41_03_02
21. Borovik A.I., Rybakova E.I., Galkin S.V., Mikhailov D.N., Konoplin A.Yu. Experience of Using the Autonomous Underwater Vehicle MMT-3000 for Research on Benthic Communities in Antarctica // Oceanology. 2022. Vol. 62. P. 709–720. DOI: 10.1134/S0001437022050034
22. Inzarcev A.V., Bagnickij A.V. Planirovanie i realizacija traektorij dvizhenija avtonomnogo podvodnogo robota pri vypolnenii monitoringa v akvatorijah razlichnyh tipov; [Planning and implementation of motion trajectories of an autonomous underwater robot when monitoring in various types of water areas]; Podvodnye issledovaniya i robototehnika, № 2(22), 2016, pp. 25-35
23. Borejko A.A., Inzarcev A.V., Mashoshin A.I., Pavin A.M., Pashkevich I.V. Sistema upravlenija ANPA bol'shoj avtonomnosti na baze mul'tiagentnogo podhoda; [Control system of high autonomy AUV on the base of multi-agents technology]; Podvodnye issledovaniya i robototehnika, № 2(28), 2019, pp. 23-31 DOI: 10.25808/24094609.2019.28.2.003
24. Laptev K.Z., Bagnickij A.V. Zadacha dlja ANPA dal'nego radiusa dejstviya po poisku polynej pri plavanii v arkticheskikh rajonah; [The problem of ice-holes searching by long-range AUV sailing in the arctic areas]; Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. – 2019. – № 1 (203). – pp. 28-38. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-1-28-38
25. Inzarcev A.V., Eliseenko G.D., Panin M.A., Pavin A.M., Bobkov V.A. Morozov M.A. Otladka algoritmov inspekcii podvodnyh truboprovodov na borte ANPA s pomoshh'ju udalennogo vysokoproizvoditel'nogo modelirujushhego kompleksa; [Investigation of underwater pipeline inspection algorithms onboard the AUV via remote high-performance modeling framework]; Podvodnye issledovaniya i robototehnika, № 2(26), 2018, pp. 28-36. DOI: 10.25808/24094609.2018.26.2.004

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Валерьевич Багницкий, старший научный сотрудник лаборатории систем управления, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ИПМТ ДВО РАН), 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5А.
 Старший научный сотрудник лаборатории машинной графики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ИАПУ ДВО РАН), 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5. e-mail: bagn@marine.febras.ru

Andrey V. Bagnitckii, senior researcher of control systems laboratory, Institute of Marine Technology Problems Far East Branch of RAS (IMTP FEB RAS), 690091, Vladivostok, Sukhanova str., 5A.
 Senior researcher of computer graphics laboratory, Institute of Automation and Control Processes Far East Branch of RAS (IACP FEB RAS), 690041, Vladivostok, Radio str., 5. e-mail: bagn@marine.febras.ru

Александр Вячеславович Инзарцев, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории систем управления, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ИПМТ ДВО РАН), 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5А.

Alexander V. Inzartsev, Dr. Sci. (Eng), chief researcher of control systems laboratory, Institute of Marine Technology Problems Far East Branch of RAS (IMTP FEB RAS), 690091, Vladivostok, Sukhanova str., 5A.
 Chief researcher of computer graphics laboratory, Institute of Automation and Control Processes Far East Branch of RAS (IACP FEB RAS), 690041,

Главный научный сотрудник лаборатории машинной графики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ИАПУ ДВО РАН), 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5. e-mail: inzar@marine.febras.ru

Vladivostok, Radio str., 5. e-mail: inzar@marine.febras.ru

Михаил Андреевич Панин, научный сотрудник лаборатории систем управления, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ИПМТ ДВО РАН), 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5А.

Mikhail A. Panin, researcher of control systems laboratory, Institute of Marine Technology Problems Far East Branch of RAS (IMTP FEB RAS), 690091, Vladivostok, Sukhanova str., 5A.

Научный сотрудник лаборатории машинной графики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ИАПУ ДВО РАН), 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5. e-mail: kars25rus@mail.ru

Researcher of computer graphics laboratory, Institute of Automation and Control Processes Far East Branch of RAS (IACP FEB RAS), 690041, Vladivostok, Radio str., 5. e-mail: kars25rus@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.08.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.08.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 21.08.2023.

Научная статья

УДК: 656.61.052.4

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.036>

Методы планирования ограждения опасностей для контроля в системах управления движением судна

А.С. Васьков¹ as.vaskov@mail.ru, А.А. Мироненко² alex_mironenko@mail.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, ²Государственный университет морской и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

Аннотация. В статье исследуется возможность использования основных навигационных параметров (пеленг и дистанция), а также их суммы, разности и параллельного индекса для формирования ограждающих опасностей изолиний при планировании маршрута судна в условиях прибрежного плавания. Для этих целей приводится математическое обоснование применения комбинации пеленгов и дистанции, из которых вычисляются параллельные индексы и кривые второго порядка: окружности, эллипсы, гиперболы. Предлагается новый подход использования аппроксимирующих кривых в виде многополюсного эллипса для ограждения опасностей. Разработан метод ориентировки исходных расположений навигационных ориентиров под конфигурацию водного пути и маршрут судна на основе поворота и переноса систем координат, связанных с ориентирами. Предложен метод формирования навигационных параметров ограждающих изолиний в соответствии с конфигурацией и взаимным расположением узкости и линии заданного пути для контроля безопасного движения судна. Основные положения исследования подкрепляются графической интерпретацией, а приводимые выражения доведены до уровня непосредственного практического применения. Формализация предлагаемых методов и алгоритмов ограждения опасностей в автоматических навигационных комплексах или системах управления автономными судами позволит судоводителю на борту и управляющему дистанционно решать задачи обработки соответствующей навигационной информации в прибрежных и стеснённых районах плавания на качественно новом уровне в неразрывной связи с традиционными лоцманскими методами контроля.

Ключевые слова: навигационный параметр, пеленг, дистанция, изостадия, изогона, многополюсный эллипс, ограждение навигационных опасностей.

Для цитирования: Васьков А.С., Мироненко А.А., Методы планирования ограждения опасностей для контроля в системах управления движением судна. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 110—119. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.036

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.036>

Method of no-go area fencing lines planning in vessel traffic control systems

Anatoliy S. Vas'kov¹ as.vaskov@mail.ru, Aleksandr A. Mironenko² alex_mironenko@mail.ru

¹Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, Russian Federation, ²Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article discusses the possibility of using the main navigation parameters (bearing and distance), as well as their sum, difference, and parallel index, to form isolines enclosing no-go areas when planning a vessel's route in coastal navigation conditions. For this purpose, a mathematical justification is given for using a combination of bearings and distances, from which parallel indices and second-order curves are calculated: circles, ellipses, and hyperbolas. A new approach of using approximating curves in the form of a multipolar ellipse for fencing no-go areas is proposed. A method of positioning navigation landmarks adapted to the configuration of the waterway and the vessel's route, based on the rotation and transfer of coordinate systems of landmarks, is developed. The method of formation of navigation parameters of enclosing isolines in accordance with the configuration and relative location of the narrowness and the line of a given path to control the vessel's safe navigation is proposed. The main aspects of the study are illustrated graphically, and the expressions obtained are brought to the level of direct practical application. The formalization of the proposed no-go area fencing lines in the automatic navigation systems or autonomous ship control systems will help solve the problem of processing the navigation information in coastal navigation areas and narrows at a qualitatively new level along with the traditional pilot's control methods.

Key words: navigational parameters, bearing, distance, position circle, isogon, multifocal ellipse, no-go area fencing lines.

For citation: Anatoliy S. Vas'kov, Aleksandr A. Mironenko, Method of no-go area fencing lines planning in vessel traffic control systems. Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 1, P. 110—119. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.036

Введение

Важной задачей обеспечения безопасности мореплавания, в соответствии с требованиями SOLAS-74, STSW-78, А.893(21), является текущий

контроль движения судна по запланированному маршруту. При этом вдоль линии запланированного пути (ЛЗП) должны учитываться все известные навигационные опасности (НО) [1 – 15] и обеспечиваться достаточное пространство для

маневров. В исследовании [1, 6, 15] отмечается, что в стесненных водах наиболее распространенным, простым и удобным оперативным способом контроля движения судна относительно ЛЗП, НО является регулярное измерение навигационных параметров (НП), к которым относятся пеленги и дистанции до неподвижных ориентиров или их комбинация, параллельный индекс (ПИ). Эти НП, их изолинии (линии положения (ЛП)) и ПИ используются в качестве ведущих ЛП (ВЛП) вдоль ЛЗП, ограждающих ЛП (ОЛП) относительно опасностей и контрольных ЛП (КЛП) (в зарубежных источниках, *blind navigation*) с учетом оценки погрешностей [1, 8 – 10, 13, 14].

Поэтому весьма актуально рассмотрение различных комбинаций традиционно измеряемых НП (пеленг и дистанция) навигационных ориентиров для использования в качестве ОЛП, применение и исследование новых аппроксимирующих зависимостей. Возможности бортовых навигационных комплексов, *ECDIS*, *CARP* по автоматической обработке навигационной информации, сопровождению объектов, прокладке на электронной карте любых аналитических кривых, позволяют решить поставленные задачи ограждения НО и районов, которые следует избегать (в зарубежных источниках, *no go area (NGA)*). Это расширит спектр практического судовождения при выборе судоводителем на борту или управляющему судном дистанционно, как методов планирования маршрута, так и контроля движения судна относительно НО, что положительно повлияет на безопасность традиционного и автономного судовождения.

1. Постановка задачи

Целью исследования является исключение недостатков применения различных аналитических кривых в автоматизированных навигационных комплексах и внедрение новых технологий [1, 2, 5-8, 11, 13, 14-17]:

1) традиционных навигационных методов контроля движения судна с «привязкой» к ориентирам измеряемыми НП в *ECDIS* и системах автоматического управления;

2) обеспечение необходимой избыточности и комплексирования информации, для безопасной проводки судна при автоматическом и интеллектуальном управлении по ЛЗП;

3) использование единообразных выражений для задания ЛЗП и полосы безопасной проводки.

Планирование маршрута судна включает математическое описание, «привязку» элементов ее аппроксимирующей кривой к конфигурации узкости (радиусу кривизны и его изменению), маневренным качествам, контролем движения по НП. Это указывает на необходимость разработки новых моделей маршрута судна, ограждением НО, связи с традиционными методами планирования и управления по ЛЗП средствами *ECDIS*, в том числе, в автоматическом режиме.

Под построением программных движений [1, 15] понимается формализация безопасного пространства при вероятных маневрах в процессе перемещения некоторой точки судна по ЛЗП с заданным скоростным режимом, контроля движения и безопасности измеряемыми НП и их комбинаций.

Эта технология сводится к выбору НП, исходя из взаимного расположения ЛЗП, контрольных точек на ЛЗП, ориентиров и НО. Например, для ВЛП желательнее подбирать НП ориентиров, изолинии или ЛП которых совпадают с ЛЗП судна, используя максимальные возможности их точности [Ссылка на статью]. Для ОЛП подбираются НП ориентиров, изолинии или ЛП которых действительно ограждают ЛЗП судна от НО, а при построении этих изолиний на карте необходимо также учитывать возможные средние квадратические погрешности (СКП) [1].

В целях совершенствования процессов планирования ЛЗП судна и последующего контроля движения в системах управления, предлагается рассмотреть различные НП и кривые второго порядка для ограждения НО. При этом предлагается исследовать изолинии, образованные, в том числе, по нескольким навигационным ориентирам, включая их особенности, во взаимосвязи с традиционными НП и их комбинациями, измеряемыми техническими средствами навигации, в том числе, автоматически.

2. Ограждение навигационных опасностей изолиниями

2.1. Ограждение навигационных опасностей изолиниями прямого и обратного пеленгов

На малых дистанциях от ориентира до судна (в пределах визуальной и радиолокационной видимости) поверхность Земли традиционно принимается за плоскость. При измерении прямого и обратного пеленгов с судна на ориентир с помощью пеленгатора или радиолокатора, визуальный и радиолокационный лучи распространяются по линиям кратчайших дистанций между судном и ориентиром, что для плоскости соответствует прямым линиям [1, 18]. На картах равноугольной цилиндрической проекции, традиционно используемой в судовождении, отрезки изолиний прямого пеленга (изоазимута или изопеленга) и обратного (ортодромия) симметричны относительно локсодромии – прямой линии, соединяющей одни и те же точки. Ортодромическая поправка между локсодромией и ортодромией (изоазимутой) не превышает $0,5^\circ$ на дистанциях до 16 миль в широтах до 75° , что меньше погрешностей измерений, поэтому обе изолинии представляются прямой – локсодромией [1].

На основании анализа [1], свойства этих изолиний и линий положения (ЛП) представляются градиентом и соответствующей СКП:

$$g_n = \frac{57,3^\circ}{D}; \quad \tau_n = \Pi - 90^\circ = \text{ОП} + 90^\circ; \quad m_{лп} = \frac{m_u}{g_n}, \quad (1)$$

где g_n – модуль градиента пеленга, $^\circ/\text{мили}$; D – дистанция между судном и ориентиром, мили; Π , ОП , τ_n – прямой и обратный локсодромические пеленги, направление градиента пеленга, $^\circ$; $m_{лп}$, m_u – СКП линии положения и измерений.

Для уменьшения СКП ЛП при контроле соответствующих НП, т.е. повышения безопасности проводки судна по ЛЗП необходимо иметь большие значения модуля градиента (1), что достигается выбором ближайших к судну ориентиров.

В практическом судовождении планирование изолинии ограждающего навигационного параметра (НП_о) или ОЛП и контроля движения происходит следующим образом:

1. На карте выбирается навигационный ориентир предпочтительнее на направлении соответствующего прямолинейного отрезка ЛЗП.

2. От ориентира касательно НО проводятся и подписываются пеленги с учетом навигационного запаса на СКП (1), управляемость и т.п. рис. 1.

3. На мониторе радиолокационной станции (РЛС) выставляются электронные визиры (ЭВ), по направлениям, соответствующим наибольшему и

наименьшему значениям НПо (см. рис.1, 120,0° и 107,0°).

4. Безопасность движения судна оценивается отсутствием касания запланированного значения ОЛП=П_о радиолокационной отметки ориентира на мониторе РЛС. Смещение судна в направлении НО компенсируется коррекцией вектора скорости судна относительно грунта (см. рис.1, изменением влево).

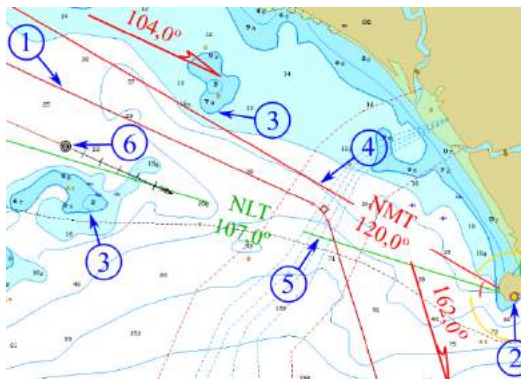
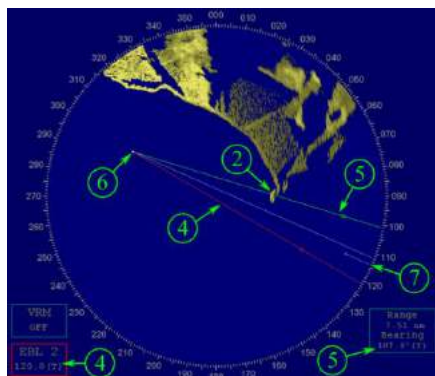


Рис. 1 – Ограждение опасностей по ОЛП – пеленга на ECDIS и CARP:

1 – ЛЗП; 2 – приметный навигационный ориентир; 3 – НО; 4 – ОЛП=П_о с наибольшим значением 120,0° на ECDIS и CARP (NMT – not more than (не более чем)); 5 – ОЛП=П_о с наименьшим значением 107,0° на ECDIS и CARP (NLT – not less than (не меньше чем)); 6 – текущая позиция судна, справа от ЛЗП; 7 – отметка курса.

2.2. Ограждение навигационных опасностей изолиниями дуг окружностей

В навигации на морских навигационных картах или современных ECDIS окружность малого круга (изостадия) может использоваться ограждающей изолинией НО [1, 6, 9, 13, 14]. Ограждающая изостадия контролируется ее НПо – дистанцией до ориентира. Уравнение изостадии в прямоугольной системе координат с центром в ориентире рис. 2 (точка O(A)) или со смещенным центром имеет вид и параметры [1, 18]:

$$x^2 + y^2 = R^2 = D_o^2; \quad (x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 = R^2 = D_o^2;$$

$$\tau_D = \Pi \pm 180^\circ; \quad g_D = 1, \quad (2)$$

где x, y, x_o, y_o – координаты прямоугольные локальные и смещенного центра окружности; D_o, τ_D, g_D – ограждающий НПо – заданная дистанция, направление и модуль градиента.

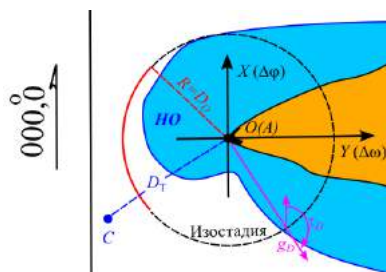


Рис.2 – Ограждение навигационной опасности изостадией – НПо, $R = D_o = \text{const}$:

C – текущие позиция судна; $\Delta\varphi, \Delta\omega$ – разность широт и отшествия координат судна и ориентира.

Допустимое смещение позиции судна ((см. рис. 2 влево) до ограждающей изостадии – D_o оценивается дистанцией

$$DTE = D_T - D_o = D_T - R, \quad (3)$$

где DTE – дистанция от позиции судна до ограждающей изостадии – D_o ; τ – индекс текущих значений.

После процесса планирования ЛЗП для контроля на мониторе РЛС выставляется подвижный круг дальности (ПКД) радиусом равным дистанции опасного сближения ($R=D_o$), относительно ориентира рис.3. Безопасное движение обеспечивается отсутствием касания выставленного ПКД с радиолокационной отметкой берегового ориентира (см. рис. 2) или изображением береговой черты (см. рис. 3). Сближение судна с линией, ограждающей НО, компенсируется коррекцией направления вектора скорости судна относительно грунта (см. рис.3 изменением вправо).

Дуга малого круга (2), проходящая через два ориентира (A, B), является также изолинией (изогоной) горизонтального угла, измеренного непосредственно или как разность измеренных пеленгов двух ориентиров, ограждает НО рис. 4 [18]:

$$\gamma_o = \Pi_A - \Pi_B; \quad \tau_\gamma = \Pi_A + \delta; \quad g_\gamma = \frac{57,3^\circ d}{D_B D_A};$$

$$ct\phi = \frac{D_A \sin \gamma_o}{D_B - D_A \cos \gamma_o}; \quad R_o = \frac{d}{2 \sin \gamma_o}, \quad (4)$$

где γ_o, d – горизонтальный угол, базовое расстояние между ориентирами; Π_A, Π_B, δ – пеленги на ориентеры (A, B) и вспомогательный угол; τ_γ, g_γ – направление и модуль градиента горизонтального угла; D_A, D_B – дистанции до ориентиров A, B.

Контроль осуществляется по разности измеренных пеленгов (Π_A, Π_B) ориентиров, определяющие горизонтальный угол [18], в системе управления, а допустимое смещение судна с учетом (4) оценивается выражениями:

$$DTE = R_T - R_o = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{\sin \gamma_T} - \frac{1}{\sin \gamma_o} \right);$$

$$DTE = \frac{D_A D_B (\gamma_T - \gamma_0)}{57,3^\circ d}; \quad \gamma_T = \Pi_{AT} - \Pi_{BT} \cdot (5)$$

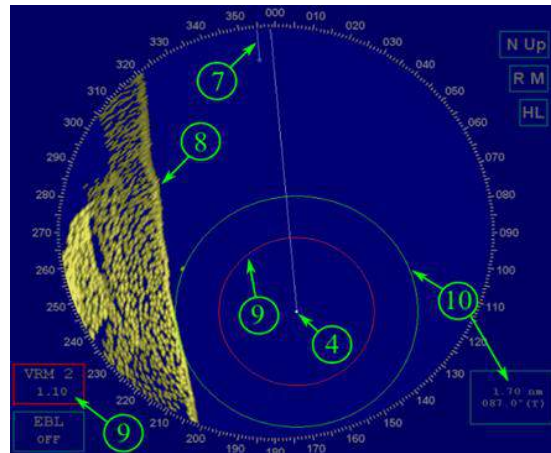
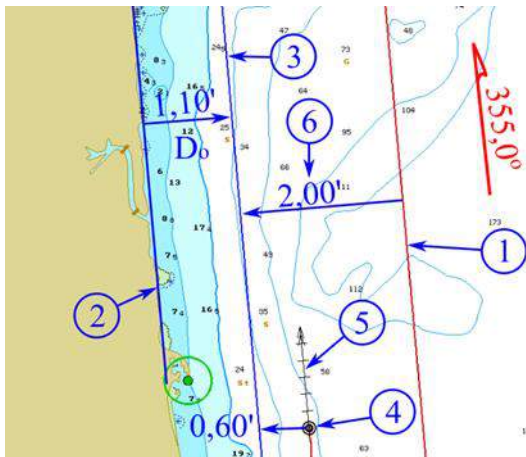


Рис. 3 – Ограждение прямолинейной навигационной опасности по НП₀ – дистанции на ECDIS и CAPT: 1 – прямолинейный отрезок ЛЗП (355,0°); 2 – участок береговой черты, практически параллельный ЛЗП; 3 – линия параллельная ЛЗП, ограждающая НО; 4 – текущая позиция судна на ECDIS и РЛС; 5 – вектор скорости судна относительно грунта; 6 – DTE допустимое (безопасное) отклонение от ЛЗП влево; 7 – отметка курса; 8 – изображение береговой черты на ИКО РЛС; 9 – ПКД = 1,10 мили; 10 – текущая дистанция до береговой черты 1,70 мили.

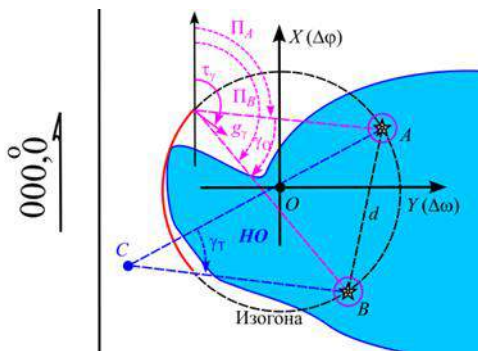


Рис.4 – Ограждение навигационной опасности изогоной – НП₀ – $\gamma_0 = \text{const}$: γ_m – текущий горизонтальный угол; $\Pi_A \Pi_B$ – пеленги на ориентиры А и В для контроля НО.

2.3. Ограждение навигационных опасностей параллельными индексами

Параллельный индекс (ПИ) представляет собой линию, параллельную базовой, проложенной через точечный ориентир или касательно площадным ориентирам, по заданному направлению (пеленгу). ПИ характеризует некоторую совокупность точек, образованную двумя НП – пеленгом на ориентир и дистанцией смещения от базовой линии. Данная технология конструктивно реализована в РЛС и широко используется при плавании в стеснённых водах в качестве ВЛП, ОЛП или КЛП [1].

В практическом судовождении процесс использования ПИ для ограждения опасностей сводится к следующей последовательности.

1. Выполнение предварительной прокладки на навигационной карте, рис. 5:

а) выбор и выделение на навигационной карте приметных радиолокационных неподвижных ориентиров, например, руководствуясь СКП ЛП (1);

б) прокладка отрезков локсодромий «базовых линий» по касательной к выбранным НО (для точечных – через ориентир) и параллельно соответствующим прямолинейным отрезкам ЛЗП (для ОЛП). Если это возможно, то базовые линии целесообразно прокладывать касательно двум ориентирам, соответственно ЛЗП параллельно им, что позволит ориентироваться в ситуации выхода из строя компаса или его связи с РЛС;

с) прокладка отрезков локсодромий ЛЗП, ОЛП;

д) измерение и запись кратчайших дистанций от базовых линий навигационных ориентиров до ЛЗП, соответственно для ОЛП (D_0).

2. Для контроля движения судна по ЛЗП относительно НО, на мониторе РЛС выполняется:

а) выбор режима отображения, шкалы дальности РЛС, и т.п., в соответствии с текущей навигационной обстановкой;

б) установка направления ПИ (электронной линии) по направлению прямолинейного отрезка ЛЗП и текущей поправки компаса

$$\tau_{ПИ} = \Pi_{УЛЗП} - \Delta K, \quad (6)$$

где $\tau_{ПИ}$, $\Pi_{УЛЗП}$, ΔK – направления ПИ, ЛЗП и поправка компаса, °;

с) смещение ПИ (электронной линии) относительно позиции судна на мониторе РЛС в сторону расположения базовой линии относительно прямолинейного отрезка ЛЗП на величину кратчайших дистанций (D_0);

д) надёжная идентификация навигационного ориентира на мониторе РЛС, контроль положения его эхо-сигнала и тенденции его смещения относительно ОЛП;

е) при приближении выставленного ПИ к радиолокационной отметке навигационного ориентира, осуществляется изменение направления вектора движения относительно грунта.

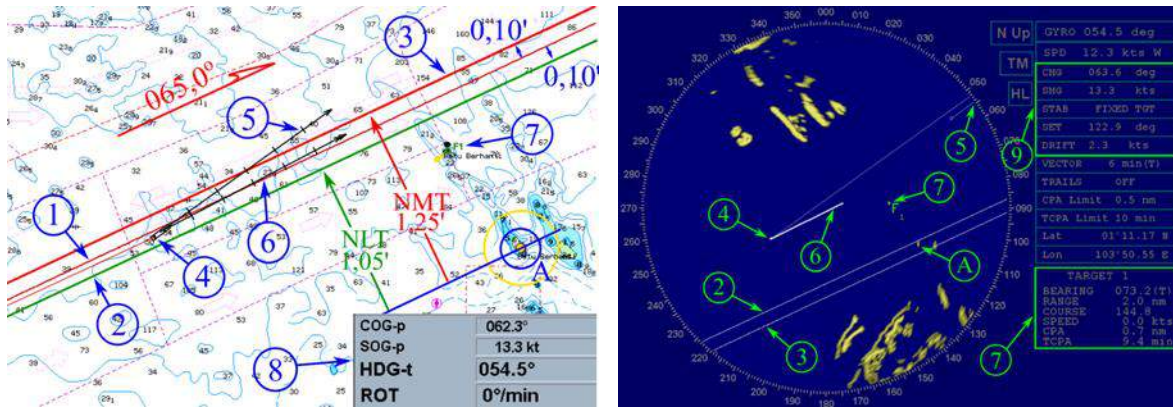


Рис. 5 – Принципы ограждения опасностей параллельным индексом – ПИо:

1 – ЛЗП (065,0°); 2 – ПИо банки с опасными глубинами справа от ЛЗП (NLT 1,05'); 3 – ПИо границы полосы СРД слева от ЛЗП (NMT 1,25'); 4 – текущая позиция судна; 5 – направление ДП судна – истинный курс (ИК); 6 – направление вектора движения судна относительно грунта; 7 – неподвижный ориентир для привязки и расчета параметров движения судна (F₁ – номер цели САРП) и данные по цели; 8 – параметры движения судна по данным ECDIS; 9 – параметры движения судна по береговому ориентиру (F₁); А – приметный береговой ориентир, выбранный для контроля движения по ЛЗП.

2.4. Ограждение навигационных опасностей изолиниями дуг эллипса

При ограждении НО изолиниями дуг эллипса безопасность движения судна по ЛЗП в системе управления контролируется измерением НП_о – суммы дистанцией до ориентиров (А, В), являющихся его фокусами. В прямоугольной системе координат в центре базы между ориентирами (А, В) рис.6, или со смещенным центром уравнение эллипса имеет вид [16, 18]:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1; \quad \frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} = 1; \quad (7)$$

$$D_A + D_B = 2a; \quad D_A = a + ex = \sqrt{(x + 0,5d)^2 + y^2};$$

$$b = \sqrt{a^2 - \frac{d^2}{4}}; \quad e = \frac{d}{2a}; \quad \tau_{\Sigma 2D} = \frac{\pi_A + \pi_B}{2} \pm 180^\circ; \quad (8)$$

$$w = \pi_B - \pi_A; \quad g_{\Sigma 2D} = |2 \cos(0,5w)|,$$

где a, b, e – большая, малая полуоси и эксцентриситет эллипса; D_A, D_B – дистанции до ориентиров (А, В); τ_{Σ2D}, g_{Σ2D} – направление и модуль градиента эллипса; w – базовый угол.

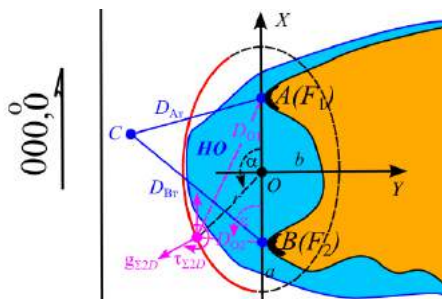


Рис.6 – Ограждение навигационной опасности дугой эллипса, (D_A + D_B)_о = const: (D_{Am} + D_{Bm}) > (D_A + D_B)_о – смещение с ЛЗП вправо.

По радиус-векторам дистанций от ориентиров из выражений (7), (8) и базовому расстоянию в системе управления определяются координаты точек изолинии – дуги эллипса, ограждающей НО:

$$x = \frac{D_A^2 - D_B^2}{2d}; \quad y = \sqrt{D_A^2 - \left(\frac{D_A^2 - D_B^2 + d^2}{2d}\right)^2}. \quad (9)$$

В полярных координатах с началом в фокусе эллипса (ориентире А) или его центре из выражений (8) получаются радиус-векторы, связанные дистанциями до ориентиров, базовым расстоянием, перичентральным и центральным углами, текущие значения которых можно использовать для контроля положения судна системой управления относительно ограждающей изолинии – дуги эллипса:

$$D_{Ar} = \frac{0,5(D_{Ar} + D_{Br})^2 - d^2}{D_{Ar} + D_{Br} + d \cos \varepsilon_r};$$

$$r_r = \frac{(D_{Ar} + D_{Br}) \sqrt{(D_{Ar} + D_{Br})^2 - d^2}}{2 \sqrt{(D_{Ar} + D_{Br})^2 - d^2 \cos^2 \alpha_r}}, \quad (10)$$

где D_{Ar}, r_r – радиус-вектор от фокуса ориентира – А и центра эллипса – О до позиции судна – С; ε_r, α_r – перичентральный и центральный углы от направления базы – ОХ до направления из фокуса – ориентира и центра эллипса на позицию судна.

Допустимое смещение судна от ЛЗП до ограждающей дуги эллипса контролируется сравнением текущей суммы дистанций с заданной контрольной (D_{Ar} + D_{Br}) > (D_A + D_B)_о или по смещению линии положения (DTE) из выражений (8) (см. рис.6)

$$DTE = \frac{(D_{Ar} + D_{Br}) - (D_A + D_B)_o}{2 \cos(0,5w)}. \quad (11)$$

2.5. Ограждение навигационных опасностей изолиниями дуг гиперболы

При ограждении НО изолиниями дуг гиперболы безопасность движения судна по ЛЗП в системе управления контролируется измерением НП_о – разности дистанций до ориентиров (А, В), которые являются ее фокусами. В прямоугольной системе координат, связанной с центром базы между ориентирами (А, В) рис. 7, или со смещенным центром, ее уравнение имеет вид и параметры [18]:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1; \quad \frac{(x - x_0)^2}{a^2} - \frac{(y - y_0)^2}{b^2} = 1; \quad (12)$$

$$D_B - D_A = \Delta D = 2a; \quad e = \frac{d}{2a}; \quad b = \sqrt{\frac{d^2}{4} - a^2};$$

$$\tau_{\Delta D} = \frac{\Pi_A + \Pi_B}{2} \pm 90^\circ; \quad g_{\Delta D} = 2 \sin \frac{w}{2}, \quad (13)$$

где $\tau_{\Delta D}$, $g_{\Delta D}$ – направление и модуль градиента гиперболы.

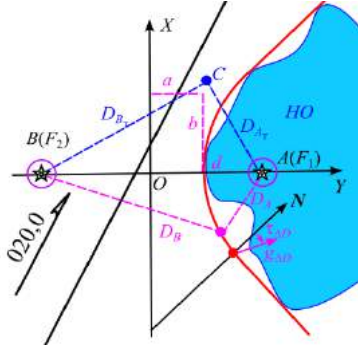


Рис.7 – Ограждение навигационной опасности дугой гиперболы, $\Pi_{\text{П}} - D_B - D_A = \text{const}$; $(D_{Aм} - D_{Bм}) < (D_B - D_A)_0 = \text{смещение с ЛЗП вправо с запасом до ОЛП}$.

По радиус-векторам дистанций от ориентиров, уравнению (12) и базовому расстоянию в системе управления определяют координаты точек ограждающей изолинии – дуги гиперболы:

$$x = \frac{(D_A + a)}{e} = \frac{D_B^2 - D_A^2}{2d};$$

$$y = \sqrt{\frac{d^2 - (D_B - D_A)^2}{4} \left(\left(\frac{D_B + D_A}{d} \right)^2 - 1 \right)}. \quad (14)$$

Уравнение гиперболы в полярных координатах с началом в фокусе – ориентире А, подобно эллипсу, после преобразований, дает радиус-векторы, связанные с текущими измеряемыми дистанциями до навигационных ориентиров, базовым расстоянием и перичентральным углом, который может использоваться для контроля движения в системе управления судном:

$$D_{A\tau} = \frac{a_\tau (e_\tau^2 - 1)}{1 + e_\tau \cos \varepsilon_\tau} = \frac{d^2 - (D_{B\tau} - D_{A\tau})^2}{2(D_{B\tau} - D_{A\tau} + d \cos \varepsilon_\tau)}. \quad (15)$$

Допустимое смещение судна (DTE) с ЛЗП может контролироваться системой управления сравнением текущей и ограждающей разности дистанций $(D_{B\tau} - D_{A\tau}) < (D_B - D_A)_0 = \text{const}$ или по смещению линии положения из выражений (1), (13) (см. рис.7) и корректируются соответствующими перекладками руля (влево/ вправо):

$$DTE = \frac{(D_{B\tau} - D_{A\tau}) - (D_B - D_A)}{2 \sin(0,5w)}. \quad (16)$$

2.6. Ограждение навигационных опасностей изолиниями многофокусного эллипса

В качестве расширения возможностей классической навигации и современных навигационных систем предлагается рассмотреть использование изолинией многофокусных эллипсов для ограждения навигационных опасностей. В стесненных водах зачастую существует возможность выбора нескольких ориентиров для целей контроля безопасности судоходства. Рассмотрение

разнообразных кривых (изопеленга, изостадии), построенных по результатам измерения различных традиционно используемых $\Pi_{\text{П}}$ и их комбинаций ($\Pi_{\text{И}}$), обуславливается во многих случаях перекрытием значительной области навигационного пространства [24] доступного для безопасного маневрирования судна, т.е. происходит существенное уменьшение акватории возможного маневрирования.

Это можно исключить реализацией задач приближения замкнутых кривых многофокусными эллипсами, как класса приближающих функций в приложении к судоходству, сформулированных в исследовании [20 – 24], которые по своей формулировке не отличается от классической аппроксимации.

Многофокусный эллипс, ограждающий опасность, демонстрируется на рис.8, его уравнение имеет вид:

$$\sum_{i=1}^k D_i = \text{const}, \quad (17)$$

где D_i – расстояния от произвольной точки многофокусного эллипса до i -го фокуса; k – количество фокусов.

Из выражений свойств отдельных эллипсов (8) выводится направление и модуль градиента изолинии ограждающего многофокусного эллипса:

$$\tau_{\Sigma 3D} = \text{arctg} \left(\frac{\sum_{i=1}^k \sin \tau_i}{\sum_{i=1}^k \cos \tau_i} \right);$$

$$g_{\Sigma 3D} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^k \sin \tau_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^k \cos \tau_i \right)^2}; \quad (18)$$

где $\tau_{\Sigma 3D}$, $g_{\Sigma 3D}$ – направление и модуль градиента многофокусного эллипса.

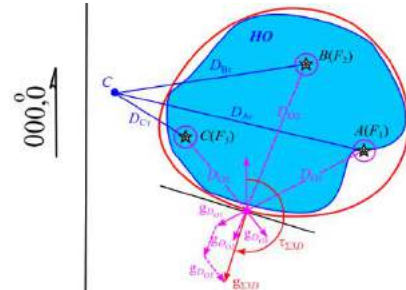


Рис.8 – Ограждение навигационной опасности многофокусным эллипсом, $\Pi_{\text{П}} - D_{01} + D_{02} + D_{03} = \text{const}$; $(D_{m1} + D_{m2} + D_{m3}) > (D_{01} + D_{02} + D_{03}) = \text{const}$ – смещение с ЛЗП вправо с запасом до ОЛП.

Допустимое смещение судна (DTE) с ЛЗП может контролироваться системой управления сравнением сумм текущих и ограждающих дистанций $(D_{\tau 1} + D_{\tau 2} + D_{\tau 3}) > (D_{01} + D_{02} + D_{03}) = \text{const}$ или по смещению линии положения из выражений (1), (18) (см. рис.8) и корректируются соответствующими управляющими воздействиями, в частности, перекладками руля (влево/ вправо):

$$DTE = \frac{(D_{\tau 1} + D_{\tau 2} + D_{\tau 3}) - (D_{01} + D_{02} + D_{03})}{g_{\Sigma 3D}}. \quad (19)$$

Многофокусный эллипс (k -фокусный), в частном случае 3-х фокусный, можно рассматривать как семейство точек пересечения $(k - 1)$ эллипсов с общими фокусами, рис. 9. Тогда при условии (17), из выражений (8) следует:

$$\sum_{i=1}^3 D_i = (D_1 + D_2 + D_3) = \text{const}; \quad (20)$$

$$D_1 + D_2 = 2a_1 = const; \quad D_2 + D_3 = 2a_2 = const; \\ D_1 - D_3 = 2(a_1 - a_2) = const. \quad (21)$$

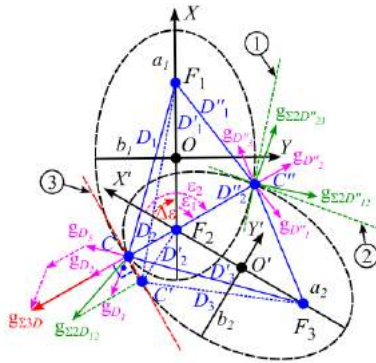


Рис.9 – Принцип построения 3-х фокусного огибающего эллипса по точкам пересечения 2-х фокусных эллипсов.

C, C', C'' – точки пересечения эллипсов (7) с общим фокусом F_2 , принадлежащим 3-х фокусному эллипсу; 1, 2, 3 – линии положения к изолиниям суммы 2-х и 3-х дистанции соответственно.

Последнее выражение (21) определяет свойство гиперболы. После преобразований из выражений (8), (9) получается принцип построения точек k -фокусного огибающего эллипса:

$$x = \frac{D_1^2 - D_3^2}{2(d_1 - d_3)}; \quad y = \sqrt{D_2^2 - \left(x + \frac{d_2}{2}\right)^2}. \quad (22)$$

С учетом выражения (9) получаются радиус-векторы, связанные с измеряемыми расстояниями до навигационных ориентиров, базовыми расстояниями и перичентральным углом для фокуса F_2 в следующих видах:

$$\rho_i = D_i = \frac{a_1(1 - e_1^2)}{1 + e_1^2 \cos \varepsilon_i} = \frac{0,5(D_1 + D_2)((D_1 + D_2) - d_1^2)}{D_1 + D_2 + d_1 \cos \varepsilon_i}; \quad (23)$$

$$\rho_i = D_i = \frac{a_2(1 - e_2^2)}{1 + e_2^2 \cos(\varepsilon_i + \Delta\varepsilon)} = \frac{0,5(D_3 + D_2)((D_3 + D_2) - d_2^2)}{D_3 + D_2 + d_2 \cos(\varepsilon_i + \Delta\varepsilon)}, \quad (24)$$

где $\Delta\varepsilon$ – угол между направлениями главных полуосей 2-х фокусных эллипсов.

Из выражения (20), с учётом (18) и пояснений рис. 9, получаются общие уравнения двух 2-х фокусных эллипсов, дающих координаты точек пересечения, принадлежащих 3-х фокусному эллипсу:

$$D_1 + D_2 \pm \lambda g_{\Sigma 2D} = D_1' + D_2' = const; \\ D_2 + D_3 \mp \lambda g_{\Sigma 2D} = D_2' + D_3' = const; \quad (25) \\ D_1 + D_2 + D_3 = D_1' + D_2' + D_3' = const,$$

где λ – минимальное Евклидово расстояние между двумя соседними точками на дуге 3-х фокусного эллипса, $g_{\Sigma 2D}$ – градиент суммы двух дистанций (8).

Построение 3-х фокусного огибающего эллипса также следует из традиционного в судовождении метода определения места судна по двум ЛП (получение точек C и C'' через совместное решение системы линейных уравнений ЛП к изолиниям 2-х фокусных эллипсов, см. рис. 9, 1 и 2). Следующие точки (см. рис. 9 точка C') получаются из совместного решения выражений (25) при малости приращений проекций градиентов на ЛП к изолинии 3-х фокусного эллипса (см. рис. 9, 3), т.е.

$$\lambda g_{\Sigma 2D} \sin \Delta\tau = \lambda g_{\Sigma 2D} \sin(\tau_{\Sigma 2D} - \tau_{\Sigma 2D ij}).$$

2.7. Поворот и параллельный перенос начала координат

Расположение систем навигационных ориентиров, совпадающих с центром принятой системы координат (см. рис.4, 6, 7) являются частными случаями в судовождении. При представлении этими кривыми (2), (7), (12) огибающих изолиний движения судна на любых участках маршрута необходимы аффинные преобразования – перенос и поворот системы координат, связанной с ориентирами, в соответствии с планируемыми ЛЗП (см. рис.4, 6, 7). Результат этих преобразований будет подобен технологии переноса и поворота для ПИ, но только не прямых, а кривых второго порядка (2), (7), (12). Перенос определяется приращениями локальных прямоугольных или географических координат, а угол поворота оси, связанной с ориентирами, разностью ее направлений относительно меридиана рис.10 (для эллипса, см. рис.6) [18, 24]

$$\vec{S} = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} = \sqrt{\Delta X'^2 + \Delta Y'^2} = \sqrt{\Delta\varphi^2 + \Delta w^2} = \quad (26) \\ = \sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2}; \quad \beta = \Pi_{x'} - \Pi_x,$$

где \vec{S} , β – перенос и угол поворота системы координат, связанной с ориентирами; $\Delta X, \Delta Y, \Delta X', \Delta Y'$ – относительные переносы систем координат; Π_x, Π_x – направления осей до и после поворота; $\Delta\varphi, \Delta w$ – разность широт и отшествие географических координат переноса начала системы координат.

Прямоугольные координаты огибающих дуг изолиний (7), (12), (17), (20) после поворота и переноса системы координат относительно исходной системы, связанной с ориентирами ($O'X'Y'$), определяются выражениями:

$$x = x' \cos \beta - y' \sin \beta - \Delta X; \\ y = x' \sin \beta - y' \cos \beta - \Delta Y. \quad (27)$$

Взаимосвязь пеленгов и дистанций с судна на навигационные ориентиры (A', B') в процессе его движения по ЛЗП с координатами ориентиров определяются из соответствующих локсодромических треугольников, образованных положением судна и ориентиров (см. рис.10):

$$D_{AT} = \sqrt{\Delta\varphi_A^2 + \Delta w_A^2}; \quad \operatorname{tg} \Pi_A = \Delta w_A / \Delta\varphi_A;$$

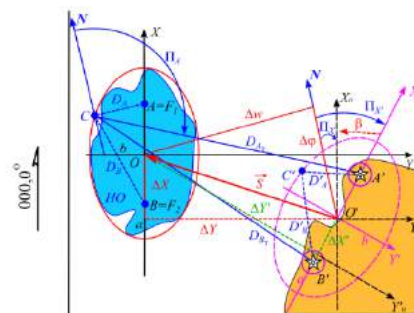


Рис.10 – Перенос и поворот системы координат, относительно центра базы навигационных ориентиров:

$X'O'Y'$ – исходные координаты, связанные с ориентирами; $X_o'OY_o'$ – исходные координаты после переноса; XOY – координаты после поворота и переноса к HO ; D_{Am}, D_{Bm} – текущие измеренные дистанции до ориентиров от позиции судна (C) – на огибающей изолинии.

$$D_{BT} = \sqrt{\Delta\varphi_B^2 + \Delta w_B^2}; \quad tg\Gamma_B = \Delta w_B / \Delta\varphi_B, \quad (28)$$

где $\Delta\varphi_A$, Δw_A , $\Delta\varphi_B$, Δw_B – разности широт и отсчетов географических координат исходных ориентиров (A' , B') и текущей позиции судна (C).

Заключение

Применение кривых второго порядка во взаимосвязи с конфигурацией взаимного расположения ориентиров и ЛЗП в современных навигационных комплексах позволит расширить спектр применимости ускоренных и автоматических методов планирования и контроля движения судна по НП, что очень важно для перспективного автономного судовождения.

Детальному исследованию подлежит проблема наилучшего выбора взаимного расположения навигационных ориентиров для аппроксимируемого участка маршрута и конфигурации района плавания. Оптимального выбора измеряемых НП (пеленг и дистанция), с точки зрения точности проводки судна и простоты контроля движения судна. При этом с помощью дуг эллипсов и гипербол более строго ограждаются опасности непосредственно по ее конфигурации, не охватывая пространство доступное для маневрирования судна.

Актуально рассмотрение вариантов кривых, позволяющих аналитически задавать физически

реализуемые программные траектории, в том числе, во взаимосвязи с предполагаемыми силовыми воздействиями, в целях повышения безопасности традиционного и автономного судовождения в стесненных и портовых водах.

Предлагаемый метод параллельного переноса и поворота баз кривых второго порядка (2), (7), (12), связанных с ориентирами, подобен реализованным в РЛС технологиям параллельной индексации, но только прямых линий. Современные компьютерные технологии и средства отображения информации позволяют осуществить подобную реализацию для любых кривых линий.

Применение технологии ПИ обладают рядом преимуществ перед использованием таких НП, как дистанция и пеленг в возможности их применения для любой конфигурации взаимного расположения ориентиров и судна при практическом сохранении точности и непрерывности контроля (см. рис.5).

При прокладке базовой линии через два ориентира, как линейного створа, появляется возможность контроля ориентации при внезапном выходе из строя компаса при соответствующих корректировках режима индикации изображения РЛС и более надёжная идентификация ориентиров. В практике судовождения идентификация по двум характерно расположенным ориентирами надежнее идентификации по одному.

Литература

1. Васьков А.С., Мироненко А.А. Контроль движения судна по навигационным параметрам и параллельным индексам. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2022. Т.14, № 6. С. 826-836.
2. Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Шуленина А.В. Моделирование схемы безопасного движения морской акватории // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 3-1(53). С.127-134.
3. Жмур А.А., Логиновский В.А. Применение теории владения ситуацией при изучении отчетов о расследовании случаев посадки судов на мель. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. 2018. Т.10. № 6. С.1200-1210.
4. Каретников В.В., Козик С.В., Буцанец А.А. К вопросу оценки рисков использования безэкипажных средств водного транспорта на участке акватории. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. 2019. Т.11. № 6. С. 987-1002.
5. Корнев А.С., Хабаров С.П., Шпекторов А.Г. Формирование траекторий движения безэкипажного судна. Морские интеллектуальные технологии. №4. Т.1. 2021. С.158 – 165.
6. Мироненко А.А. Методология формирования навигационной обстановки и программирования движений судна. Новороссийск: РИО ГМУ им. адм. Ф.Ф.Ушакова, 2016. 162 с.
7. Смоленцев С.В., Исаков Д.В., Солодовниченко М.Б. Проблема прогнозирования траекторий движения судов в акватории. Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адм. С.О.Макарова. 2022. Т.14. № 1. С. 7–16.
8. Benedict K., Kirchhoff M., Gluch M., Fischer S. & Schaub M., Baldauf M. Simulation-Augmented Methods for Safe and Efficient Manoeuvres in Harbour Areas. TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2016. Vol.10. № 2. Pp.193—201.
9. Bole A., Wall A., Norris A. Radar and ARPA Manual Radar, AIS and Target Tracking for Marine Radar Users. UK, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 552 p.
10. Burger W. Radar observer's handbook for Merchant Navy Officers. Glasgow: Brown Son & Ferguson Ltd, Nautical Publishers, 1998. 446 p.
11. Ernstsen J., Nazir J.S. Human Error in Pilotage Operations. TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2018. Vol.12. № 1. Pp.49—56.
12. Jurdzinski M. Causes of ships groundings in terms of integrated navigation model. Annual of navigation. 2017. Vol.24. Pp.119 –135.
13. Sivriu G., Georgescu S. Planning and execution of blind pilotage and anchorage. Constanta Maritime University Annals. 2010. Vol.14. P.35 – 40.
14. Swift A.I. Bridge team management. A Practical Guide. Southall, Meddlesex: O'Sullivan Printing, 2004. 118 p.
15. Васьков А.С., Мироненко А.А. Проблемы контроля поворота судна. Эксплуатация морского транспорта. 2011. № 3(65). С.17-20.
16. Васьков А.А. Формирование траектории движения судна. Изв. Вузов. Сев.-Кавказ. регион. Техн. Науки. Спецвып. Проблемы водного транспорта. 2004. Ч.1. С.14 – 16.
17. Ююкин И.В. Сплайн-интерполяция навигационных изолиний. Вестник государственного университета

- морского и речного флота им. адм. С.О.Макарова. 2019. Т.11, № 6. С.1026-1036.
18. Мореходные таблицы (MT–2000). № 9011. СПб.: ГУНиО МО РФ, 2002. 576 с.
 19. Петров А.А. Алгоритмическое обеспечение информационно-управляющих систем адаптивных роботов. Итоги науки и техники. Сер. Техн. кибер-ка. М.: ВИНТИ, 1987. Т.21. С. 92 – 130.
 20. Erdős P., Vincze I. On the approximation of convex, closed plane curves by multifocal ellipses. J. Appl. Probab. 1982. 19A. Pp.89–96.
 21. Melzak Z.A., Forsyth J.S. Polyconics 1: Polyellipses and optimization. Quart. Appl. Math. 1977. 35. Pp.239–255.
 22. Nie J., Parrilo P.A., Sturmfels B. Semidefinite representation of the k-ellipse. Algorithms in algebraic geometry. Springer, New York, 2008. Pp.117-132.
 23. Sekino J. n-Ellipses and the Minimum Distance Sum Problem. The American Mathematical Monthly. 1999, Mar. Vol.106. №3. Pp. 193 – 202.
 24. Васьюков А.С., Мироненко А.А. Взаимосвязь систем координат положения и кинематических характеристик движения судна. Эксплуатация морского транспорта. 2022. № 1(102). С.28-33.

References

1. Vas'kov A.S., Mironenko A.A. Kontrol' dvizheniya sudna po navigatsionnym parametram i parallel'nym indeksam [Vessel movement control by navigational parameters and parallel indices]. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2022. T.14, № 6. S. 826-836.
2. Grinyak V.M., Devyatitsil'nyy A.S., Shulenina A.V. Modelirovaniye skhemy bezopasnogo dvizheniya morskoy akvatorii [Modeling of the scheme of safe movement of the marine area]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii. 2021. № 3-1(53). S.127-134.
3. Zhmur A.A., Loginovskiy V.A. Primeneniye teorii vladeniya situatsiyey pri izuchenii otchetov o rassledovanii sluchayev posadki sudov na mel' [Application of the theory of situation control in the study of reports on the investigation of cases of ship stranding]. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O. Makarova. 2018. T.10. № 6. S.1200-1210.
4. Karetnikov V.V., Kozik S.V., Butsanets A.A. K voprosu otsenki riskov ispol'zovaniya bezekipazhnykh sredstv vodnogo transporta na uchastke akvatorii [On the issue of assessing the risks of using unmanned water transport vehicles in a section of the water area]. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O. Makarova. 2019. T.11. № 6. S. 987-1002.
5. Korenev A.S., Khabarov S.P., Shpektorov A.G. Formirovaniye trayektoriy dvizheniya bezekipazhnogo sudna [Formation of the trajectories of the movement of an unmanned vessel]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii. №4. T.1. 2021. S.158 – 165.
6. Mironenko A.A. Metodologiya formirovaniya navigatsionnoy obstanovki i programmirovaniya dvizheniy sudna [Methodology for the formation of the navigation environment and the programming of vessel movements]. Novorossiysk: RIO GMU im. adm. F.F.Ushakova, 2016. 162 s.
7. Smolentsev S.V., Isakov D.V., Solodovnichenko M.B. Problema prognozirovaniya trayektoriy dvizheniya sudov v akvatorii [The problem of predicting the trajectories of ships in the water area]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O.Makarova. 2022. T.14. № 1. S. 7–16.
8. Benedict K., Kirchoff M., Gluch M., Fischer S. & Schaub M., Baldauf M. Simulation-Augmented Methods for Safe and Efficient Manoeuvres in Harbour Areas. TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2016. Vol.10. № 2. Pp.193—201.
9. Bole A., Wall A., Norris A. Radar and ARPA Manual Radar, AIS and Target Tracking for Marine Radar Users. UK, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 552 p.
10. Burger W. Radar observer's handbook for Merchant Navy Officers. Glasgow: Brown Son & Ferguson Ltd, Nautical Publishers, 1998. 446 p.
11. Ernsten J., Nazir J.S. Human Error in Pilotage Operations. TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2018. Vol.12. № 1. Pp.49—56.
12. Jurdzinski M. Causes of ships groundings in terms of integrated navigation model. Annual of navigation. 2017. Vol.24. Pp.119 –135. 13.
13. Sivriu G., Georgescu S. Planning and execution of blind pilotage and anchorage. Constanta Maritime University Annals. 2010. Vol.14. P.35 – 40.
14. Swift A.I. Bridge team management. A Practical Guide. Southall, Meddlesex: O'Sullivan Printing, 2004. 118 r.
15. Vas'kov A.S., Mironenko A.A. Problemy kontrolya povorota sudna [Problems of ship turn control]. Eksploatatsiya morskogo transporta. 2011. № 3(65). S.17-20.
16. Vas'kov A.A. Formirovaniye trayektorii dvizheniya sudna [Formation of the ship's trajectory]. Izv. Vuzov. Sev.-Kavkaz. region. Tekhn. Nauki. Spetsvyp. Problemy vodnogo transporta. 2004. CH.1. S.14 – 16.
17. Yuyukin I.V. Splayn-interpolyatsiya navigatsionnykh izolinii [Spline interpolation of navigation contours]. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O.Makarova. 2019. T.11, № 6. S.1026-1036.
18. Morekhodnyye tablitsy (MT–2000) [Nautical tables (MT–2000)]. № 9011. SPb.: GUNiO MO RF, 2002. 576 s.
19. Petrov A.A. Algoritmicheskoye obespecheniye informatsionno-upravlyayushchikh sistem adaptivnykh robotov [Algorithmic support of information and control systems of adaptive robots]. Itogi nauki i tekhniki. Ser. Tekhn. kiberka. M.: VINITI, 1987. T.21. S. 92 – 130.
20. Erdős P., Vincze I. On the approximation of convex, closed plane curves by multifocal ellipses. J. Appl. Probab. 1982. 19A. Pp.89–96.
21. Melzak Z.A., Forsyth J.S. Polyconics 1: Polyellipses and optimization. Quart. Appl. Math. 1977. 35. Pp.239–255.
22. Nie J., Parrilo P.A., Sturmfels B. Semidefinite representation of the k-ellipse. Algorithms in algebraic geometry. Springer, New York, 2008. Pp.117-132.

23. Sekino J. n-Ellipses and the Minimum Distance Sum Problem. The American Mathematical Monthly. 1999, Mar. Vol.106. №3. Pp. 193 – 202.
24. Vas'kov A.S., Mironenko A.A. Vzaimosvyaz' sistem koordinat polozheniya i kinematicheskikh kharakteristik dvizheniya sudna [The relationship of coordinate systems of position and kinematic characteristics of the movement of the vessel]. Eksploatatsiya morskogo transporta. 2022. № 1(102). S.28-33.

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

Анатолий Семенович Васьков, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Судовождение, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 393518, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: as.vaskov@mail.ru

Anatoliy S. Vas'kov, Dr. Sci. (Eng)s, Professor, Professor of the Department of Navigation, Admiral Ushakov State Maritime University, 353918, Novorossisk, Lenin's avenue, 93, Russian Federation, e-mail: as.vaskov@mail.ru

Александр Анатольевич Мироненко, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Навигации, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О.Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: alex_mironenko@mail.ru

Aleksandr A. Mironenko, Dr. Sci. (Eng)s, assistant Professor, Professor of the Navigation Department Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035, Saint-Petersburg, Dvinskaya, st. 5/7, Russian Federation, e-mail: alex_mironenko@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 25.05.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 26.06.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 27.07.23

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING

Научная статья

УДК 656.6.058

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.012>

Перспективы подводной транспортировки отработавшего ядерного топлива

В.Ю. Каминский¹ Kaminskyvy@yandex.ru, Д.А. Скороходов¹ skorohodda@mail.ru,

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. Подводные грузоперевозки имеют существенный потенциал для развития особенно с учетом современной тенденции к преимущественному использованию экологически устойчивых и эффективных видов транспорта. Исследована транспортная проблема в Арктической зоне РФ и показана возможность ее решения с применением подводной робототехники, в частности с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). Показано, что смарт-технологии обеспечивают автоматизацию и контроль судовых систем, позволяя осуществить автоматическую прокладку курса, динамическое позиционирование, контроль грузовых операций и балластных вод и др. Утверждается, что применение искусственного интеллекта при подводных грузоперевозках, в том числе и с помощью грузовых АНПА, способствует повышению безопасности и эффективности процесса транспортировки. Важным аспектом функционирования АНПА является планирование маршрутов движения. Это сложная задача, требующая анализа большого количества данных и учета множества факторов. Современные технологии и методы позволяют АНПА реализовывать эффективные решения, оптимизировать маршруты и обеспечивать безопасное и экономичное движение. Утверждается, что подводная транспортировка отработавшего ядерного топлива позволяет использовать возможности подводной среды и преимущества автономных подводных аппаратов, а также сокращает экологические риски и обеспечивает безопасность и экономическую эффективность перевозки.

Ключевые слова: отработавшее ядерное топливо, транспортировка, автономный необитаемый подводный аппарат, интеллектуальная навигационная сеть, экологическая безопасность, навигационная поддержка, эффективность.

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. Перспективы подводной транспортировки отработавшего ядерного топлива, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 120—130. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.012

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.012>

Prospects for underwater transportation of spent nuclear fuel

Valery Yu. Kaminsky¹ Kaminskyvy@yandex.ru, Dmitriy A. Skorokhodov¹ skorohodda@mail.ru

¹Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences

Abstract. Underwater cargo transportation has a significant potential for development, especially taking into account the current trend towards the predominant use of environmentally sustainable and efficient modes of transport. The transport problem in the Arctic zone of the Russian Federation is investigated and the possibility of its solution with the use of underwater robotics, in particular with the help of autonomous uninhabited underwater vehicles (ANPA), is shown. It is shown that smart technologies provide automation and control of ship systems, allowing for automatic heading, dynamic positioning, control of cargo operations and ballast water, etc. It is argued that the use of artificial intelligence in underwater cargo transportation, including with the help of cargo ANPA, contributes to improving the safety and efficiency of the transportation process. An important aspect of the functioning of the ANPA is the planning of routes. This is a complex task that requires analyzing a large amount of data and taking into account many factors. Modern technologies and methods allow ANPA to implement effective solutions, optimize routes and ensure safe and economical movement. It is argued that the underwater transportation of spent nuclear fuel makes it possible to use the capabilities of the underwater environment and the advantages of autonomous underwater vehicles, as well as reduces environmental risks and ensures the economic efficiency of transportation.

Keywords: spent nuclear fuel, transportation, autonomous uninhabited underwater vehicle, intelligent navigation network, environmental safety, navigation support, efficiency.

Financial Support: The work was carried out within the framework of the execution of the state task of the IPT RAS No. 075-01352-23-0 for 2023 and for the planning period of 2024 and 2025 at the expense of the subsidy provided by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Agreement on the provision of subsidies from the federal budget for financial support of the implementation of the state task No. 075-03-2023-431 dated 13.01.2023).

For citation: Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorohodov Prospects for underwater transportation of spent nuclear fuel, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 1, P. 120—130. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.012

Введение

Подводная транспортировка - это процесс перемещения грузов под водой с использованием специальных подводных средств передвижения, таких как подводные лодки и беспилотные подводные аппараты (дистанционно управляемые и автономные подводные аппараты).

Первые попытки создания подводного транспортного средства были предприняты ещё в XVII веке. Голландец Корнелиус Дреббель (1572-1633) – изобретатель, физик и химик разработал его в 1620 году. Это было деревянное судно, которое могло погружаться и всплывать благодаря балластным цистернам. Судно приводилось в движение гребцами.

В России в 1834 г. инженер генерал-адъютант Карл Андреевич Шильдер построил на Александровском литейном заводе подводный корабль водоизмещением 16,4 т, который принято считать первенцем российского подводного флота. Корпус представлял собой продолговатое, яйцеобразное тело, слегка сплюснутое с боков длиной около 6 м, при ширине 1,5 м и высоте 1,8 м. Глубина погружения - 12 м. Экипаж лодки состоял из 13 человек. В движение лодка приводилась четырьмя гребцами с помощью двух пар бортовых гребков типа "утинная лапа".

В Германии транспортные подлодки для грузоперевозок были созданы во время Первой мировой войны [1]. В 1916 году германская верфь во Фленсбурге построила две подводные лодки: «Дойчланд» и «Бремен». Они были нужны для обхода морской блокады Антанты и торговли с Соединенными Штатами. Эти были грузовые лодки и имели длину около 60 метров, а водоизмещение около 1500 тонн. Лодки были оснащены дизельными двигателями и могли развивать скорость до 10 узлов на поверхности и до 6 узлов под водой. Всего, с 1914 по 1944 год в Германии было разработано шесть проектов транспортных подводных лодок, которые были построены и использовались в ходе боевых действий. Основным предназначением этих лодок было обеспечение боеприпасами, топливом, ГСМ, провизией и пресной водой боевых подводных лодок, ведущих подводную войну с Великобританией и США.

Япония с 1942 по 1945 год разработала и реализовала пять проектов грузовых подлодок. Помимо перевозки стратегического сырья, военнотранспортных, боеприпасов, топлива, продуктов и медикаментов японские транспортные лодки доставляли в районы боевого применения людей-торпед (камикадзе). Япония построила самую большую транспортную подлодку, которая была способна перевозить одновременно до 1200 тонн различных грузов. Всего, в годы войны, в Японии было построено 43 транспортные подводные лодки.

В США в период с 1942 по 1970 год было разработано шесть проектов подлодок: транспортных, включая один подводный танкер, транспортно-десантных — это были минные заградители, и десантно-транспортных подводных лодок, в том числе и атомных. Все лодки были

построены. Некоторые из них вплоть до 1993 года модернизировались и до сих пор остаются в строю.

В 1940–60-е годы советские инженеры разрабатывали проекты подлодок для перевозки наливных и сыпучих грузов подо льдом по Северному морскому пути [2].

В 1943 г. был спроектирован подводный транспорт — танкер, водоизмещением 6000 т. Подводная лодка имела два прочных корпуса внутри одного легкого. Прочные корпуса располагались один над другим. Верхний, более крупный, использовался для груза, а в нижнем размещались механизмы и экипаж.

В 1958–1962 г. разрабатывался проект грузовой подводной лодки для перевозки наливных и сыпучих грузов подо льдом по Северному морскому пути. Разработчики пытались устранить сезонность в арктических навигациях. Среди преимуществ нового типа судна назывались: независимость плавания подводной лодки от состояния моря и погоды, отсутствие волнового сопротивления на достаточной глубине.

Всего, в период с 1943 по 1972 год в СССР было разработано девять проектов подводных лодок, спланировать масштабные перевозки боевой техники, военных грузов и грузов двойного назначения. Все разработки были доведены до уровня эскизного проекта, по отдельным проектам изготовили технические чертежи, по одному из них было начато строительство. В дальнейшем работы были прекращены из-за финансовых и технических проблем, связанных с одновременным созданием боевых атомных субмарин и транспортных подводных лодок двойного назначения. В итоге приоритет был отдан боевому подводному судостроению.

Особенности и перспективы подводной транспортировки грузов

Характер движения подводных судов отличается от движения судов надводных. Обеспечение надежной эксплуатации подводных транспортных средств сравнительно более сложная техническая задача. К техническим трудностям добавляются сложности подводной навигации. Возникновение чрезвычайных ситуаций представляет большую опасность, особенно при движении подо льдами, что, в свою очередь, требует более развитого комплекса средств спасения по сравнению с надводными судами.

Принципиальное отличие конструкции подводных транспортных средств, связанное с перемещением под водой, заключается в следующем.

Подводные аппараты спроектированы таким образом, чтобы иметь отрицательную плавучесть. Для поддержания необходимой глубины погружения используется подъемная сила, создаваемая изменением массы воды в балластных танках или при помощи гидродинамических поверхностей.

Подводные суда должны быть герметичными, для сохранения жизнедеятельности экипажа и для защиты оборудования от повреждений. Суда оснащаются специальными навигационными системами, которые позволяют им определять свое

местоположение под водой и контролировать направление движения.

Подводные транспортные суда используют особые системы пропульсии на базе электродвигателей, гидравлических систем или ядерных реакторов, в зависимости от типа и назначения судна и оснащаются специальными системами жизнеобеспечения, которые осуществляют управление температурой, уровнем кислорода и удаляют углекислый газ.

Подводное перемещение грузов в свою очередь имеет определенные преимущества. Например, на глубинах свыше 50-100 метров отсутствуют ледяные поля. Подводное плавание реализуется в однородной среде (в отличие от движения по границе двух сред у надводных судов) и при более высоком давлении воды, которое растёт с увеличением глубины. Оба эти фактора улучшают гидродинамику движения судна и повышают эффективность работы гребного винта или МГД-двигателя. Несомненными преимуществами подводных грузоперевозок являются: конфиденциальность, устойчивость транспортировки, экологичность, естественное охлаждение груза, защита груза от неблагоприятных погодных условий, отсутствие логистических проблем и пр.

Необходимо отметить, что наиболее эффективное движение под водой достигается с помощью ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Однако ЯЭУ в грузовых судах практически не используются, в основном из-за ограничений на заход таких судов в гражданские грузовые порты.

С развитием технологий подводной навигации и созданием более совершенных подводных транспортных средств, в том числе ядерных, появилась возможность эффективной транспортировки грузов под водой. В настоящее время подводные транспортные средства широко используются для транспортировки грузов, особенно для морской нефтегазовой промышленности, научных исследований и решения других специализированных задач.

Перспективным направлением является разработка специализированных судов (подводных контейнеровозов), которые обеспечат увеличение грузоподъемности и скорости подводной транспортировки, что, в свою очередь, приведёт к более эффективному использованию морских путей и улучшению глобальной логистики.

Ещё одним примером современных технологий подводного транспорта является использование автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) для перевозки грузов, что повышает эффективность и снижает затраты на транспортировку [3]. АНПА могут быть использованы для перевозки грузов на короткие расстояния или для выполнения специализированных задач, таких как исследование морского дна, обслуживание подводных станций, мониторинг окружающей среды.

В целом, применение автономных транспортных средств позволяет снизить затраты на персонал, повышает безопасность перевозок, обеспечивает экологически более устойчивый вариант доставки грузов, т.к. уменьшает поступление вредных веществ в атмосферу и способствует сохранению морских экосистем.

С развитием подводных транспортных средств становится возможной доставка грузов в труднодоступные регионы. Создание специализированных портов, складов и терминалов для обслуживания подводного транспорта будет способствовать росту этой отрасли и расширению подводной транспортной сети.

Отметим перспективность формирования мультимодальных транспортных систем, объединяющих подводную, наземную и воздушную транспортировку грузов, что обеспечивает более эффективную логистику и увеличивает гибкость доставки.

Как уже отмечалось, подводные грузоперевозки относятся к сложным технологиям, требующим специальной инфраструктуры. Перечислим основные элементы этой инфраструктуры: специальные подводные суда, специализированные порты и пристани, транспортные контейнеры и упаковочные материалы, оборудование для погрузки и выгрузки, системы связи и навигации.

Однако стоит отметить, что подводная транспортировка грузов имеет ограничения, связанные с высокой стоимостью разработки и поддержания инфраструктуры, ограниченной грузоподъемностью подводных транспортных средств и сложностью обеспечения безопасности при перевозке определенных видов грузов.

Тем не менее подводные грузоперевозки имеют потенциал для развития в различных областях, включая коммерческую логистику и военное применение, особенно с учетом тенденции к преимущественному использованию экологически устойчивых и эффективных видов транспорта. Очевидно, что технологические инновации, такие как автономная навигация, беспилотные подводные аппараты и энергосберегающие системы, будут стимулировать развитие подводных грузоперевозок.

Транспортная проблема в Арктической зоне РФ и возможность ее решения с применением подводной робототехники

Развитие арктического региона является одним из главных экономических приоритетов для Российской Федерации. Особое внимание уделяется освоению Северного морского пути и других маршрутов в акватории Северного Ледовитого океана, которые обеспечивают значительные экономические преимущества для страны. Этот транспортный коридор позволит круглогодично использовать акваторию Северного Ледовитого океана и станет коммерчески выгодным маршрутом между Атлантическим и Тихим океанами. В настоящее время судоходство по Северному морскому пути возможно только в летний период с июня по октябрь. В остальное время года наличие льда требует дорогостоящей проводки ледокольными судами, что делает северный транзитный коридор менее привлекательным с точки зрения сроков и стоимости доставки грузов.

Применение подводной робототехники может быть одним из решений транспортных проблем в Арктике.

Роботизированная транспортная система с использованием АНПА [4] - это новая концепция системы, которая позволяет перевозить грузы под водой с помощью автономных необитаемых

подводных аппаратов. АНПА могут быть оснащены различными средствами для обеспечения безопасности и контроля (рис.1), такими как гидролокаторы, фотосистемы, системы аварийной сигнализации и т.д. АНПА также могут выполнять различные задачи, такие как инспекция подводных

сооружений и коммуникаций, поиск и обезвреживание мин, исследование морского дна и т.д. АНПА могут координировать свои действия с другими АНПА или наземными станциями для передачи информации о перевозимых грузах или обнаруженных объектах.

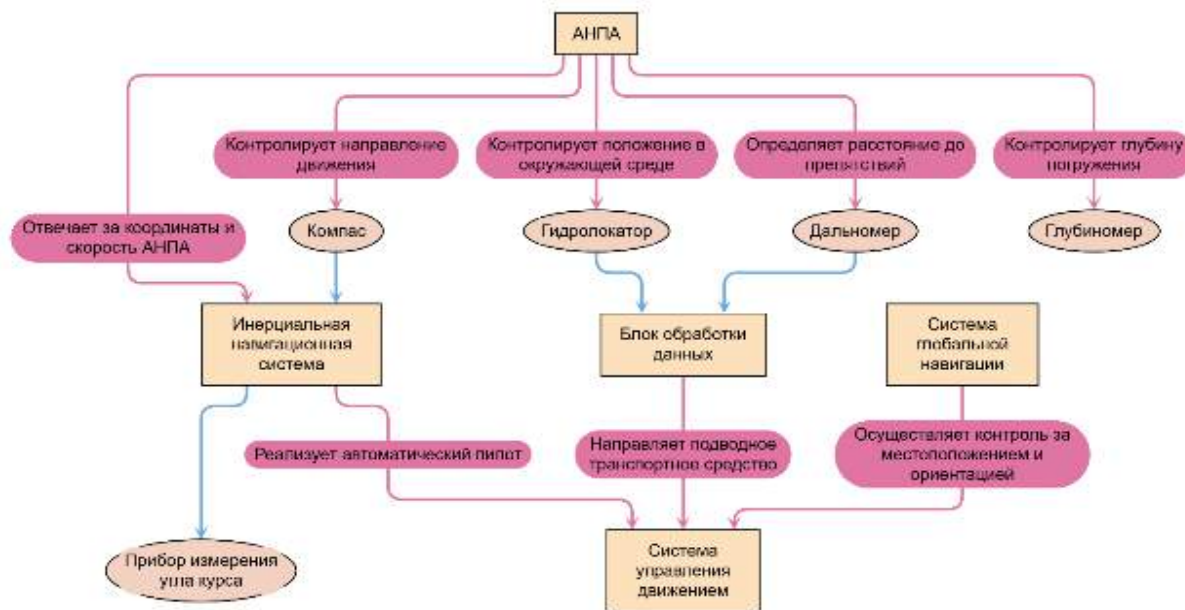


Рис. 1. Структурная схема автономного необитаемого подводного аппарата

Одним из главных преимуществ подводной робототехники является ее способность работать в условиях, недоступных для человека. Автономные необитаемые подводные аппараты могут функционировать подо льдами, проникать в глубоководные области и осуществлять мониторинг окружающей среды, выполнять поиск и спасение, транспортировку грузов. АНПА может быть использован для обследования подводной инфраструктуры, такой как подводные кабели, газопроводы и нефтяные трубопроводы, пролегающие в Арктике. Подводный аппарат может обеспечить обнаружение и локализацию потенциальных утечек или повреждений, а также регулярный мониторинг состояния инфраструктуры. АНПА могут быть оснащены сенсорами и оборудованием для сбора данных о состоянии воды, глубине, ледовом покрове, флоре и фауне, а также других параметрах в рамках проведения исследований и мониторинга морской среды в Арктике. Это будет способствовать изучению изменений климата, оценке экологической устойчивости и обеспечению безопасности. Подводные аппараты, при этом, должны оказывать минимальное воздействие на морскую экосистему.

Подводные аппараты, также, оснащаются передовыми системами искусственного интеллекта и автоматизации для принятия решения на основе предварительно заданных программ или условий.

Ещё одним направлением использования подводной робототехники является создание автономных подводных грузовых аппаратов. Они предназначаются для снабжения и перевозки оборудования к удаленным арктическим поселениям, исследовательским станциям или производственным платформам. АНПА оснащаются

различными сенсорами и инструментами для наблюдения и контроля груза и окружающей среды, включая системы видеонаблюдения, акустические датчики, системы измерения радиации и др. Операторы могут получать информацию в реальном времени о состоянии груза и условиях окружающей среды для обеспечения безопасности и для оценки эффективности транспортировки.

Использование подводных аппаратов потребует создания базовых станций для обслуживания и зарядки АНПА, прокладку подводных кабелей для связи и передачи данных, разработку системы навигации и контроля.

Технологические тенденции цифровизации судоходной отрасли

В современной судоходной отрасли можно выделить три основные тенденции: использование смарт - технологий, появление беспилотных судов и использование "зеленых" технологий. Также появляются новые технологические разработки, такие как 5G - технологии, интернет вещей, цифровые датчики и блокчейн.

Смарт технологии генерируют цифровые устройства и системы, которые делают судоходство более безопасным и эффективным. Эти технологии обеспечивают автоматизацию и контроль всех систем судна и реализуются в автоматической прокладке курса, динамическом позиционировании, системе контроля грузовых операций и балластных вод и др.

Технология 5G позволит использовать автономные подводные аппараты для удаленной инспекции судов в реальном времени и улучшить связь между судами и берегом. Интернет вещей (IoT) сделает возможным удаленное управление

различными системами на судне (двери люков, отсеки, системы переборок и гидравлика). Цифровые датчики обеспечат регистрацию основных технологических параметров эксплуатации судна и позволят обнаруживать неисправности, требующие технического обслуживания или ремонта. Технология блокчейн предоставит возможность для объединения логбуков, баз данных и другой информации судовладельцев и логистических компаний.

Одним из важных аспектов цифровизации судоходства является появление беспилотных судов. Переход к автономным судам снизит операционные расходы, исключит человеческий фактор, повысит эффективность морских перевозок и позволит ликвидировать пиратство.

Использование "зеленых" технологий, как тенденции цифровизации судоходной отрасли реализуется в следующих аспектах.

Экологически чистое топливо. Переход от использования традиционного судового топлива с высоким содержанием серы к более экологически чистому, такому как сжиженный природный газ (СПГ), электричество и водород. Это позволяет снизить выбросы парниковых газов и улучшить качество воздуха в портах и на морских маршрутах.

Энергоэффективность. Новые технологии и инновации, такие как энергосберегающие системы и улучшенные дизайны корпусов судов, обеспечивают снижение энергопотребления и повышают эффективность использования топлива, что приводит к уменьшению выбросов и сокращению негативного воздействия на окружающую среду.

Альтернативные источники энергии. Внедрение возобновляемых источников энергии, таких как солнечная и ветровая энергия, на судах становится все более распространенным. Эти источники могут использоваться для подачи электроэнергии на борту судна, снижая потребление традиционного топлива.

Оптимизация маршрутов и логистики. С помощью анализа больших данных (Big Data) и применения искусственного интеллекта (ИИ), судовладельцы и операторы могут оптимизировать маршруты и логистику перевозок. Это позволяет сократить расходы на топливо и снизить выбросы.

В рамках цифровизации судоходной отрасли отметим технологию виртуальной и дополненной реальности для обучения, обслуживания и визуализации [5]. При обучении и тренировке моряков, отрабатываются актуальные рабочие сценарии без выхода в море. Дополненная реальность может использоваться для предоставления морякам дополнительной информации о судне, окружающей обстановке и навигационных данных.

Технология интернета вещей (IoT) предоставляет возможность связать различные устройства и системы на судне для обмена данными и для автоматизации технологических процессов. С помощью IoT суда могут быть подключены к сети, их функционирование может контролироваться удаленно. Это позволяет операторам эффективно управлять судном, а также предотвращать возможные поломки и аварии.

Беспилотные летательные аппараты (дроны) могут использоваться для инспекции судов,

мониторинга морской обстановки, доставки небольших грузов и поиска и спасения. Дроны могут быть оснащены различными датчиками и камерами, позволяющими получать детальную информацию о состоянии судов и окружающей среды.

Расширенное использование цифровых технологий в судоходстве приводит к увеличению риска кибератак. Судовые системы и сети должны быть защищены от несанкционированного доступа и вредоносных программ. Развитие технологий обнаружения и предотвращения кибератак, а также повышение осведомленности и обучение моряков по вопросам кибербезопасности являются ключевыми аспектами в этой области.

Роботизированные системы и автоматизированные процессы существенно повышают эффективность работы на судах. Например, автоматическое управление двигателями и системами судна может оптимизировать расход топлива и снизить нагрузку на экипаж.

Концепция интеллектуальной навигационной сети

Концепция интеллектуальной навигационной сети представляет собой развитие современных технологий навигации, которые позволяют АНПА и другим автономным системам выполнять свои задачи без прямого участия человека [6].

Идея заключается в создании распределенной системы навигации, состоящей из множества узлов (точек), расположенных на подводных объектах, и способных обмениваться информацией между собой. Эти узлы могут быть установлены на маяках, буйях, других АНПА или на дне.

Узлы сети оснащаются датчиками и системами сбора данных, которые обеспечивают получение информации о местоположении, скорости, направлении движения и других параметрах связанных с движением объектов. Собранная информация передается по сети другим узлам, для формирования общей картины окружающей обстановки и позиционирования АНПА.

Интеллектуальная навигационная сеть может быть объединена с другими системами, такими как система идентификации объектов, радиолокационные системы, камеры и другие устройства.

Применение интеллектуальной навигационной сети позволит автономным системам перемещаться более точно и безопасно в сложных морских условиях. Кроме того, такая сеть может использоваться для улучшения работы группы автономных систем в режиме обмена информацией и координации действий.

Для применения концепции интеллектуальной навигационной сети необходимо разработать соответствующий алгоритм сбора, обработки и передачи данных, а также установить стандарты обмена информацией между узлами сети.

Важной задачей является обеспечение безопасности работы интеллектуальной навигационной сети. Для этого могут быть использованы методы шифрования и аутентификации, а также меры по защите от взлома и саботажа.

Необходимо учесть экологические аспекты при разработке и эксплуатации сети, чтобы

минимизировать воздействие интеллектуальной навигационной сети на морскую среду.

В целом, концепция интеллектуальной навигационной может быть реализована в различных областях, включая морскую геологию, морскую биологию, подводную археологию, разведку и мониторинг подводных объектов, а также другие сферы, связанные с использованием АНПА и других автономных систем.

АНПА и искусственный интеллект

Искусственный интеллект может использоваться для анализа больших объемов данных, прогнозирования погодных условий, оптимизации маршрутов и принятия решений на основе собранной информации [7].

Путем анализа данных о местоположении, глубине, океанических условиях и других параметрах ИИ может принимать решения о маршруте, обходе препятствий и выборе оптимальных путей доставки грузов. С помощью сенсоров, таких как сонары, лидары и видеокамеры, ИИ может анализировать данные и определять наличие препятствий и расстояние до них. На основе этих данных ИИ может принимать решения о коррекции маршрута или изменении скорости движения, чтобы избежать столкновений и обеспечить безопасность транспортировки груза.

С учетом ограничений веса, баланса и стабилизации груза, ИИ может оптимизировать размещение груза, чтобы достичь максимальной грузоподъемности и обеспечить безопасность во время перевозки. Анализируя данные о расходе энергии, состоянии батарей и других факторах, ИИ управляет системами энергопотребления на борту

подводного аппарата, что может включать оптимизацию работы двигателей, регулирование работы датчиков, а также принятие решений о режиме работы, для продления времени автономной работы грузовых АНПА. Систематизируя исторические данные о течениях, погодных условиях, океанической активности и других факторах, ИИ предскажет оптимальные маршруты и время доставки грузов. Это позволяет улучшить планирование грузоперевозок, снизить риски и повысить эффективность доставки. ИИ может обрабатывать и анализировать большие объемы данных о состоянии грузов, погоде, маршрутах и т.д. На основе этих данных ИИ выявит паттерны, обеспечит оптимизацию процесса перевозки, предложит улучшения в системах управления грузами и поможет операторам принимать более обоснованные решения.

Внедрение искусственного интеллекта в организацию подводных грузоперевозок с помощью грузовых АНПА способствует повышению безопасности и эффективности. Однако, необходимо учесть такие аспекты, как разработка и обучение алгоритмов ИИ, сбор и обработка данных, а также проверка и тестирование систем, чтобы гарантировать их надежную работу в различных условиях подводной среды.

Маршрутизация и навигация подводно-подлёдного плавания

Определение и планирование маршрутов движения АНПА является важным аспектом их функционирования (рис.2).

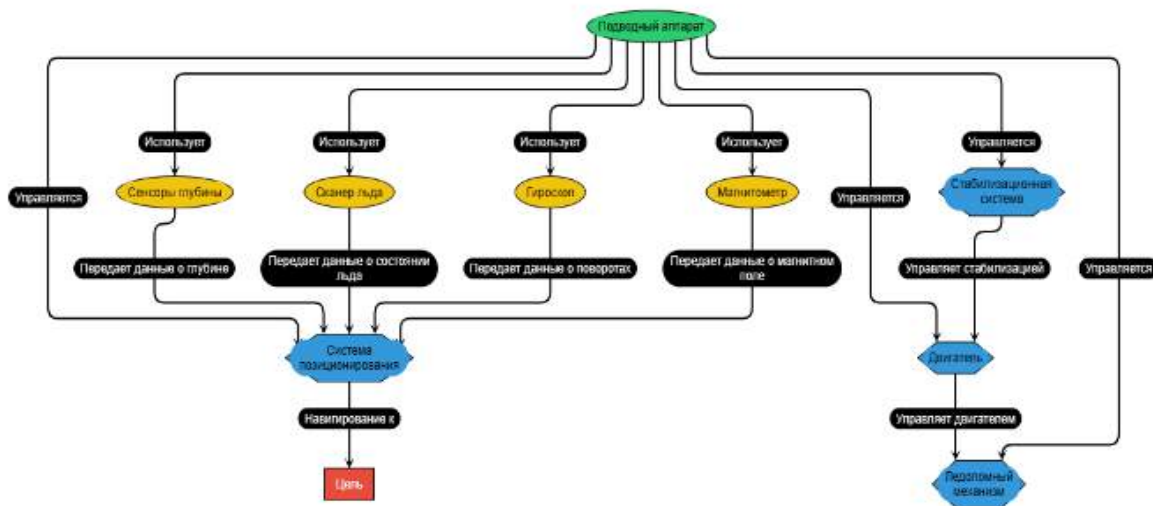


Рис. 2. Схема навигации автономного подводного аппарата при подлёдном плавании

Одним из основных инструментов навигации является глубиномер, который используется для измерения глубины погружения и определения расстояния до дна. Для более точной навигации могут использоваться системы глобального позиционирования (GPS) и инерциальные навигационные системы (ИНС), которые обеспечивают точное определение местоположения подводного судна и его ориентацию в пространстве.

Одной из основных проблем является отсутствие точной информации об окружающей среде, например, об изменениях течений, глубине, препятствиях на пути. Также, существует сложность в определении оптимального маршрута при изменении условий движения аппарата, например, при появлении новых целей или возникающих ограничениях.

Проблему можно решить, воспользовавшись гидролокацией для определения расстояния до препятствий, для измерения глубины и контроля рельефа дна. Также можно использовать карты морского дна и обновлять их с помощью сбора данных при очередном плавании. В настоящее время появилась возможность моделирования морской среды для определения оптимального маршрута в зависимости от прогнозируемых условий.

Планировать маршруты можно с использованием систем машинного обучения и искусственного интеллекта для принятия решений на основе предыдущих опытов. Однако, подобные методы требуют большого количества данных и специализированных систем, что затрудняет их реализацию.

Подводно-подледное плавание осуществляется в динамической и изменчивой подводной среде, что создаёт дополнительные проблемы при планировании маршрутов и требует учета этих факторов. В частности, для безопасного подледного плавания необходимо обеспечить эффективное детектирование льда. Для этого используются различные сенсоры и системы (сонары, видеокамеры, акустические датчики, лидары), способные обнаруживать ледяные образования и определять их толщину, форму и состояние.

В подводно-подледных условиях могут возникать проблемы со связью из-за препятствий, например, таких как льдины и трещины. Для обеспечения надежной связи между подводными и наземными/поверхностными объектами используются специальные технологии и системы, включая акустические и радиолокационные, а также подводные кабели. Для акустической связи используются специальные гидрофоны и гидроакустические передатчики. Акустические системы могут использоваться для обмена данными и коммуникации с другими подводными и поверхностными объектами.

Для подводной связи можно использовать подводный кабель. Кабель, проложенный по морскому или океанскому дну для передачи большие объемов данных с высокой скоростью, обеспечивает надежную связь между подводными и наземными/поверхностными системами.

Решение проблем подводной навигации связано с совершенствованием сенсорной системы, развитием алгоритмов искусственного интеллекта, использование активной навигации, интеграцией сетей связи, адаптивным планированием (интеграция данных и их обработка в реальном времени), повышением энергетической эффективности аппаратов.

В частности, адаптивное планирование включает использование различных алгоритмов и систем управления, которые позволяют АНПА анализировать собранные данные, принимать решения и менять режим движения. Например, если АНПА обнаруживает препятствие на своем пути, оно может автоматически изменить маршрут. АНПА должна иметь запасные планы и возможность реализации аварийного режима в случае возникновения непредвиденных ситуаций, таких как поломка оборудования или изменение условий плавания. Адаптивное планирование должно учитывать возможность перенастройки задач,

изменения маршрутов или активации аварийных процедур для обеспечения безопасности и выполнения целей маршрута.

Формирование маршрута при подводных грузоперевозках включает анализ картографической информации, сбор оперативных данных на маршруте и их анализ для определения курса (рис.3).

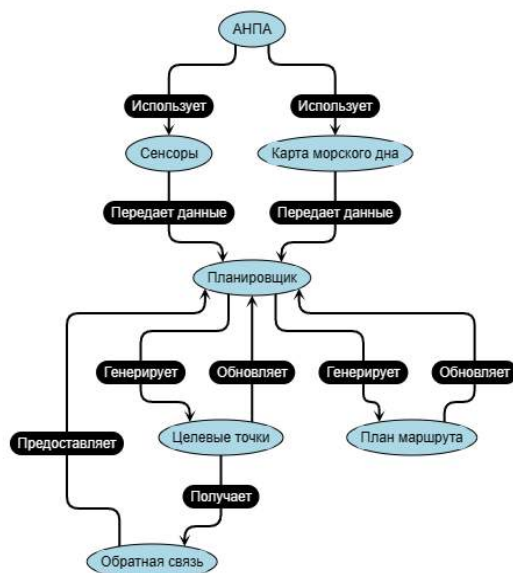


Рис.3. Схема планирования маршрута АНПА

Для этого могут использоваться алгоритмы маршрутизации, которые реализуют различные цели (например, минимизация времени в пути, экономия топлива, учет приоритетов и т. д.). Применяются методы машинного обучения и искусственного интеллекта.

В целом, определение маршрутов для АНПА является сложной задачей, требующей анализа большого количества данных и учета множества факторов. Современные технологии и методы позволяют АНПА реализовывать эффективные решения, оптимизировать маршруты и обеспечивать безопасное и экономичное движение.

Подводные пассивные ориентиры АНПА

Подводные пассивные ориентиры представляют собой статические объекты, расположенные по дну, которые могут быть использованы для определения местоположения и ориентации АНПА.

Применение подводных пассивных ориентиров для навигации АНПА имеет несколько преимуществ.

Во-первых, пассивные ориентиры не требуют активного сигнала или энергии, что позволяет АНПА работать более эффективно и экономично. Они могут быть представлены различными объектами, такими как природные образования (например, геологические формации) или искусственные конструкции (например, подводные маяки или буи, телекоммуникационные и трубопроводные коммуникации).

Во-вторых, использование подводных пассивных ориентиров позволяет АНПА определять свое местоположение независимо от систем спутниковой навигации (например, GPS). Это особенно важно в

случаях, когда сигналы GPS не доступны или недостоверны, например, в глубоководных или плотных прибрежных зонах.

Использование телекоммуникационных и трубопроводных коммуникаций в качестве навигационного обеспечения подводного транспорта является одним из способов решения проблемы ориентации аппарата и передачи данных в подводной среде. Этот подход основан на использовании существующей инфраструктуры телекоммуникационных кабелей и трубопроводов для передачи сигналов и обмена информацией [8].

Одним из основных преимуществ использования телекоммуникационных и трубопроводных коммуникаций в навигационных целях является их распространенность и протяженность. Многие морские регионы имеют сети подводных кабелей и трубопроводов, которые используются для связи и передачи энергии.

Телекоммуникационные кабели и трубопроводы могут быть оснащены датчиками и системами навигации, которые позволят подводным транспортным средствам определять свое местоположение и следовать по заданному маршруту.

Кроме навигационных задач, как уже упоминалось, телекоммуникационные кабели и трубопроводы также могут служить для обмена данными между подводными транспортными средствами и внешними объектами. Это может включать передачу информации о местоположении, состоянии транспортного средства, окружающей среде и других параметрах, необходимых для безопасной и эффективной работы. При этом должна обеспечиваться надежность и защищенность соответствующей инфраструктуры. Технические сбои, повреждение кабелей или трубопроводов могут привести к потере связи или утрате навигационной информации. Для минимизации подобных рисков необходимо защищать и резервировать инфраструктуру. Желательно использовать кабель и трубопроводы с повышенной стойкостью к механическим повреждениям, а также применять системы мониторинга и автоматического обнаружения сбоев или повреждений. Важной частью системы навигации и связи является разработка соответствующих алгоритмов и протоколов для обнаружения и корректировки ошибок. Необходимо учитывать конфиденциальность и обеспечивать защищенность передаваемой информации.

Использование телекоммуникационных и трубопроводных коммуникаций имеет потенциал для повышения точности, надежности и эффективности подводной навигации.

Перспективы подводной транспортировки отработавшего ядерного топлива

Сохраняет актуальность проблема безопасного и эффективного перемещения радиоактивных грузов, включая отработавшее ядерное топливо [9]. Одним из перспективных решений является подводная транспортировка опасных грузов.

Ключевым фактором подводной транспортировки являются уникальные характеристики подводных сред: низкая температура, стабильные условия и защита от неблагоприятных атмосферных факторов.

Подводная среда генерирует устойчивые условия транспортировки, снижая риски возникновения аварийных ситуаций и обеспечивая сохранность груза.

Еще одним преимуществом подводной транспортировки радиоактивных грузов является возможность использования автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА).

Перемещение радиоактивных грузов под водой уменьшает риск загрязнения окружающей среды, поскольку вода служит естественным барьером для радиоактивных веществ. Это особенно актуально в случае аварийных ситуаций, таких как потеря контроля над грузом или повреждение защитных контейнеров. Использование АНПА позволяет сократить время доставки, повысить гибкость планирования и реализации транспортировки радиоактивных грузов, включая ядерное топливо, радиоактивные отходы, изотопы и другие материалы, используемые в ядерной энергетике, медицине, промышленности и научных исследованиях.

Поскольку водная среда является естественным защитным барьером от радиоактивного излучения и при этом исключается контакт источника излучения с человеком в ходе подводной грузоперевозки, меняется концепция функционирования транспортно-упаковочного комплекта ТУК для размещения в нём контейнера с отработавшими тепловыделяющими сборками с целью перемещения его автотранспортом, железнодорожным, водным или воздушным транспортом [10].

Основная функция ТУК – обеспечение радиационной безопасности при транспортировке радиоактивного груза и сохранение целостности оболочки упаковки при авариях, связанных с падением упаковки. Основная масса устройства ТУК приходится на реализацию защитных функций. Например, масса загруженного ТУК-13/1В, содержащего 12 отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) составляет 104 тонны. Масса незагруженного ТУК – 96,2 тонны. Масса ТУК -137-Т с 20 размещёнными ОТВС составляет 95 тонн. Масса ТУК без ОТВС – 82 тонны [11]. Итак, примерно 90% массы ТУК с размещёнными ОТВС приходится на элементы устройства, выполняющие защитные функции. Подводная транспортировка ОТВС может осуществляться в ТУК облегчённой конструкции, при этом одновременно может перевозиться большее количество ОТВС. Для подводной транспортировки радиоактивных грузов могут использоваться грузовые АНПА, спроектированные и оборудованные специально для перевозки радиоактивных материалов.

Очевидно, что контейнеры, которые будут использоваться для подводной транспортировки радиоактивных материалов, должны быть сертифицированы. Также требуется разработка протоколов и процедур для обеспечения безопасности подводной транспортировки и управления аварийными ситуациями.

С развитием технологий АНПА, улучшением систем обнаружения и контроля, а также строгими нормами безопасности, подводная транспортировка может стать эффективным и безопасным вариантом для перемещения радиоактивных грузов.

Подводная транспортировка радиоактивных грузов позволяет использовать возможности подводной среды и преимущества автономных подводных аппаратов, а также сокращает экологические риски и обеспечивает экономическую эффективность.

Кроме того, подводная транспортировка радиоактивных грузов позволит улучшить доступность и гибкость доставки. Подводные аппараты могут обеспечить доставку этих грузов в удаленные и труднодоступные для традиционных транспортных средств места.

Важным аспектом перспектив подводной транспортировки является также минимизация риска кражи или незаконного доступа к радиоактивным материалам.

С использованием АНПА можно разрабатывать и внедрять дополнительные возможности наблюдения и контроля. Например, повышенная радиоактивность или тепловыделение груза могут быть использованы в качестве маркеров для обнаружения и слежения за подводными транспортными средствами. Это обеспечит дополнительный уровень безопасности и контроля.

Инфраструктура для подводной транспортировки радиоактивных материалов должна включать специальные подводные базы, порты или терминалы, оборудованные для приема, загрузки и выгрузки подводных радиационно-опасных транспортных систем.

Также требуется развитие систем безопасности и контроля на подводных базах и в портах, чтобы обеспечить компетентное обращение с радиоактивными материалами и защиту персонала и окружающей среды.

Заключение

Подводные грузоперевозки имеют существенный потенциал для развития особенно с учетом современной тенденции к преимущественному использованию экологически устойчивых и эффективных видов транспорта.

Применение подводной робототехники, в частности автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) может быть одним из решений транспортных проблем в Арктике.

Смарт - технологии генерируют цифровые устройства и системы, которые делают судоходство более безопасным и эффективным. Эти технологии обеспечивают автоматизацию и контроль всех систем судна и реализуются в автоматической прокладке курса, динамическом позиционировании, системе контроля грузовых операций и балластных вод и др.

Развитие технологий навигации в рамках концепция интеллектуальной навигационной сети позволяет АНПА и другим автономным системам выполнять свои задачи без прямого участия человека.

Применение искусственного интеллекта при подводных грузоперевозках, в том числе и с помощью грузовых АНПА, способствует повышению безопасности и эффективности процесса транспортировки.

Важным аспектом функционирования АНПА является планирование маршрутов движения. Это сложная задача, требующая анализа большого количества данных и учета множества факторов. Современные технологии и методы позволяют АНПА реализовывать эффективные решения, оптимизировать маршруты и обеспечивать безопасные и экономичные грузоперевозки.

Ключевым фактором подводной транспортировки являются уникальные характеристики подводных сред: низкая температура, стабильные условия и защита от неблагоприятных атмосферных факторов. Подводная среда генерирует стабильные условия транспортировки, снижая риски возникновения аварийных ситуаций и обеспечивая сохранность груза. В этой связи подводная транспортировка радиоактивных грузов позволяет использовать возможности подводной среды и преимущества автономных подводных аппаратов, а также сокращает экологические риски и обеспечивает безопасность и экономическую эффективность.

Литература

1. Малинецкий Г.Г., Смолин В.С. Подводные транспортные суда для транзитного коридора ЮВА – Европа в Северном Ледовитом океане // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 242. 46 с.
2. Савинов М. А. Советские проекты транспортных подводных лодок для Арктики (по материалам ЦГАНТД) // Полярные чтения на ледоколе «Красин». 2018. № 5, С. 266-280.
3. Харченко Ю.А., Голядкина С.С., Кудрявцев И.А. АНПА для арктического шельфа // Neftegaz.RU. 2021.№2. С.88-94.
4. Осадчий А. И., Поленин В. И. Морская подводная роботизированная транспортная система с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов / в сборнике: Технологии построения когнитивных транспортных систем. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Санкт-Петербург. 2019. С. 113-117.
5. Стариченков А. Л., Скорыходов Д. А., Каминский В. Ю., Хабаров С. П. Структура программного обеспечения системы интеллектуальной поддержки принятия решения экипажем судна // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 2-1(60). С.128-135.
6. Дубовицкий В. А. Окоороков Н. С. Концепция интеллектуальной навигационной сети для применения в системах автономного судовождения // Актуальные исследования. 2022. №21 (100). С. 10-20.
7. Маевский А.М., Кожемякин И.В. Применение систем искусственного интеллекта в морской робототехнике: мировой уровень и возможности развития в РФ // Морские информационно-управляющие системы. 2021. № 1(19). С. 24-33.
8. Скорыходов Д.А., Комашинский В.И., Поленин В.И., Бобрышев С.В. Подводный транспорт для арктической зоны Российской Федерации // Морской вестник. 2022. №3(83). С. 102-105.

9. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А. Принципы построения интеллектуальной системы экологической безопасности и навигационного сопровождения мультимодальных перевозок отработавшего ядерного топлива // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 2-1(60). С. 226-235.
10. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Расчётная оценка безопасности транспортировки отработавшего ядерного топлива // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4-1 (58). С. 162-169.
11. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Волошин К.И. Безопасность перевозки отработавшего ядерного топлива // в сборнике: Транспорт России: проблемы и перспективы – 2021. Материалы Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2021. С. 268-275.

References

1. Malineckij G.G., Smolin V.S. Podvodnye transportnye suda dlya tranzitnogo koridora YUVA – Evropa v Severnom Ledovitom okeane [Underwater transport vessels for the Southeast Asia –Europe transit corridor in the Arctic Ocean]. Preprinty IPM im. M.V.Keldysha. 2018. № 242. 46 p.
2. Savinov M. A. Sovetskie proekty transportnyh podvodnyh lodok dlya Arktiki (po materialam CGANTD) [Soviet projects of transport submarines for the Arctic (based on the materials of TSGANTD)]. Polyarnye chteniya na ledokole «Krasin». 2018. № 5, pp. 266-280.
3. Harchenko YU.A., Golyadkina S.S., Kudryavcev I.A. ANPA dlya arkticheskogo shel'fa [ANPA for the Arctic shelf]. Neftegaz.RU. 2021. №2. pp. 88-94.
4. Osadchij A. I., Polenin V. I. Morskaya podvodnaya robotizirovannaya transportnaya sistema s ispol'zovaniem avtonomnyh neobitaemyh podvodnyh apparatov [Marine underwater robotic transport system using autonomous uninhabited underwater vehicles]. V sbornike: Tekhnologii postroeniya kognitivnyh transportnyh sistem. Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Sankt-Peterburg. 2019. pp. 113-117.
5. Starichenkov A. L., Skorohodov D. A., Kaminsky V. Yu., Habarov S. P. Struktura programmnoy obespecheniya sistemy intellektual'noj podderzhki prinyatiya resheniya ekipazhem sudna [The structure of the software of the intelligent decision support system by the ship's crew]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2023. № 2-1(60). pp. 128-135.
6. Dubovickij V. A., Okorokov N. S. Konceptiya intellektual'noj navigacionnoy seti dlya primeneniya v sistemah avtonomnogo sudovozhdeniya [The concept of an intelligent navigation network for use in autonomous navigation systems]. Aktual'nye issledovaniya. 2022. №21 (100). pp. 10-20.
7. Maevskij A.M., Kozhemyakin I.V. Primenenie sistem iskusstvennogo intelekta v morskoy robototekhnike: mirovoj uroven' i vozmozhnosti razvitiya v RF [Application of artificial intelligence systems in marine robotics: world level and development opportunities in the Russian Federation]. Morskie informacionno-upravlyayushchie sistemy. 2021. № 1(19). pp. 24-33.
8. Skorohodov D.A., Komashinskij V.I., Polenin V.I., Bobryshev S.V. Podvodnyj transport dlya arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii [Underwater transport for the Arctic zone of the Russian Federation]. Morskoy vestnik. 2022. №3 (83). pp. 102-105.
9. Kaminsky V. Yu., Skorohodov D. A. Principy postroeniya intellektual'noj sistemy ekologicheskoy bezopasnosti i navigacionnogo soprovozhdeniya mul'timodal'nyh perevozok otrabotavshogo yadernogo topliva [Principles of building an intelligent environmental safety system and navigation support for multimodal transportation of spent nuclear fuel]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2023. № 2-1(60). pp. 226-235.
10. Kaminsky V. Yu., Skorohodov D.A. Raschyotnaya ocenka bezopasnosti transportirovki otrabotavshogo yadernogo topliva [Estimated safety assessment of spent nuclear fuel transportation]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2022. № 4-1 (58). pp. 162-169.
11. Kaminsky V. Yu., Skorohodov D.A., Voloshin K.I. Bezopasnost' perevozki otrabotavshogo yadernogo topliva [Safety of spent nuclear fuel transportation]. V sbornike: Transport Rossii: problemy i perspektivy – 2021. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Sankt-Peterburg, 2021. pp. 268-275.

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

Валерий Юрьевич Каминский, 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, senior lecturer, PhD, 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

Дмитрий Алексеевич Скороходов, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор кафедры, e-mail: skorohodda@mail.ru

Dmitriy A. Skorokhodov, professor, Dr. Sci. (Eng), Chief researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: skorohodda@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.07.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.07.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 01.08.2023.

Научная статья

УДК 656.61.052: 629.123: 004.021

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.013>

Навигационные системы и методы повышения их надежности и точности для решения задач предупреждения столкновений автономного судна на этапе разработки концепции

В.В. Астреин¹ Astrein-vadim@rambler.ru, В.И. Филатов¹ Filatov_viktor1994@mail.ru

¹Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93

Аннотация Успех реализации Морского автономного надводного судна (МАНС) заключается прежде всего в надежности, бесперебойности и работоспособности различных навигационных систем, применяемых в автономных судах. Эти требования распространяются прежде всего на интеллектуальные системы мониторинга, прогнозирования, планирования и принятия решений, которые образуют интеллектуальную Систему поддержки принятия решений (СППР) безопасности судовождения в режиме реального времени [1]. Одна из наиболее сложных задач решаемых СППР – это задача предупреждения столкновений судов (ЗПР_{ПСС}). Сложность ЗПР_{ПСС} заключается в проблеме многофакторного анализа, связей и противоречий интересов частей и системы в целом. На этапе разработки концепции автономного судна должна быть выполнена предварительная оценка навигационных систем по критериям надежности и точности для их установки на морских автономных и дистанционно управляемых надводных судах. Эта оценка должна включать список и всесторонний анализ навигационных систем, которые должны использоваться для решения ЗПР_{ПСС}. Кроме того, должны быть разработаны технологические методы повышения точности источников навигационной информации, схемы резервирования, комплексирования в случае отказа или угрозы изменения нормальных рабочих режимов навигационного оборудования МАНС для решения ЗПР_{ПСС} со стороны злоумышленников.

Ключевые слова: автономное судовождение, СППР, концепция мониторинга и контроля движения судна в режиме реального времени, предупреждение столкновений судов, повышение точности навигационных систем, надежность навигационных систем, комплексирование навигационных систем

Для цитирования: Астреин В.В., Филатов В.И. Навигационные системы и методы повышения их надежности и точности для решения задач предупреждения столкновений автономного судна на этапе разработки концепции, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 131—144. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.013

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.013>

Navigation systems and methods for improving their reliability and accuracy to solve problems of collision avoidance of an autonomous ship at the stage of concept development

Vadim V. Astrein¹ Astrein-vadim@rambler.ru, Viktor I. Filatov¹ Filatov_viktor1994@mail.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. The success of the implementation of the Maritime Autonomous Surface Vessel (MANS) lies primarily in the reliability, un-interrupted operation and performance of various navigation systems used in autonomous ships. These requirements apply first of all to intelligent systems for monitoring, prediction, planning and decision-making, which form an intelligent decision support system (DSS) for the safety of navigation in real time mode [1]. One of the most difficult tasks solved by the DSS is the collision avoidance. The complexity of collision avoidance challenge lies in the problem of multivariate analysis, connections and contradictions between the interest's parts of the system and such system itself. At the stage of developing the concept of an autonomous vessel, a preliminary assessment of navigation systems should be carried out according to the criteria of reliability and operability before their installation on marine autonomous and remotely controlled surface vessels. This assessment should include a list and a comprehensive analysis of the navigation systems to be used to solve the task of ship collision avoidance. Additionally technological methods should be developed to improve the accuracy of navigation information sources, redundancy schemes, and integration in a case of failure or a threat to change the normal operating modes of MANS navigation equipment to solve the task of ship collision avoidance by intruders.

Key words: autonomous navigation, DSS, the concept of real-time monitoring and control of ship movement, ship collision avoidance, navigation systems accuracy improvement, navigation systems reliability, navigation system redundancy schemes.

For citation: Vadim V. Astrein, Viktor I. Filatov. Navigation systems and methods for improving their reliability and accuracy to solve problems of collision avoidance of an autonomous ship at the stage of concept development, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 1, P. 131—144. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.013

Введение

Согласно «Положению по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС)», утвержденному Российским морским регистром судоходства (НД № 2–030101–037), вступившему в силу 01.08.2020 г. [2] на всех уровнях автоматизации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов сбор и контроль информации осуществляет Система обеспечения ситуационной осведомленности. Она ведет мониторинг и контроль трех основных систем, используемых для управления МАНС:

- системы распознавания целевой обстановки и определения положения собственного судна с возможностями их отображения;
- системы прогнозирования и безопасного расхождения судов в соответствии с МППСС-72 и хорошей морской практикой;
- системой управления движением и маневрированием [2].

Для выполнения этих функций в [2] предложен список навигационного оборудования МАНС.

Международная морская организация (ИМО) также в настоящее время проводит нормативно-правовой обзор «для внесения поправок в нормативную базу, чтобы обеспечить безопасную, надежную и экологически чистую работу частично или полностью автономных судов, а также их взаимодействие и сосуществование с судами управляемыми судодетелями» в рамках существующих инструментов ИМО [3,4]. В соответствии с п. 6.7.2 [4] планируется пересмотр Главы V «Безопасность мореплавания» Конвенции СОЛАС [5] с учетом этих поправок.

Современная нормативная база автоматизации процессов предупреждения столкновений судов (ПСС) ограничивается человеческим зрением и слухом, эхолотом, РЛС с функцией САРП, автоматизированной системой идентификации (АИС), электронной картографической навигационно-информационной системой (ЭКНИС) и глобальной спутниковой навигационной системой (ГНСС). Совокупность этих средств обеспечивает судно достаточной объективной информацией о ПСС «в существующих обстоятельствах и условиях плавания», где принятие решений осуществляется по человеко-машинной технологии (ЧМС). Однако эти технологии далеки от обеспечения безопасности при решении задач навигации и предупреждения столкновений судов на дистанционно управляемых или автономных судах, как с точки зрения надёжности, точности измеряемых параметров, так и с точки зрения получения, прогнозирования и планирования траектории движения МАНС. На этапе разработки концепции автономного судна должна быть выполнена предварительная оценка навигационных систем для установки на морских автономных и дистанционно управляемых надводных судах.

Навигационные системы, методы повышения их надежности и точности для решения задач предупреждения столкновений автономного судна на этапе разработки концепции являются предметом данной статьи.

Задача предупреждения столкновений судов

Наиболее сложной задачей для СППР МАНС является ЗПР_{ПСС}. В [6] показано, что ПСС рассматривается с позиций существования только правил (МППСС-72) вне системы. Термин Система предупреждения столкновений судов (СПСС) не встречается ни в МППСС-72, ни в их комментариях, ни в многочисленных исследованиях ПСС. Именно из-за отсутствия целостного описания и системных исследований ПСС существуют трудности по автоматизации и реализации алгоритмов ПСС в многочисленных исследованиях для автономных судов.

На автономных судах ЗПР_{ПСС} решается интеллектуальной СППР в режиме реального времени. СПСС является сложной системой, состоящей из множества элементов и подсистем. Совокупность взаимодействующих судов, распределенных на некотором пространстве водной среды, правил и предосторожностей, требующихся как «обычной, так и хорошей морской практики» МППСС-72 с целью исключения рисков столкновения судов и безопасного плавания в любых условиях образуют СПСС. Исходя из такого целостного представления ПСС, проблему интеллектуального планирования траектории движения МАНС для расхождения на безопасном расстоянии нужно рассматривать с нескольких сторон: построение траектории ПСС с учетом нечетких действий по МППСС-72 и, как правило, негативного воздействия со стороны других судов и окружающей среды.

Основная проблема построения траектории по лингвистическим неопределенностям заключается в том, что терминология МППСС-72, имеющая одинаковое лингвистическое звучание, в нечетких «обстоятельствах и условиях плавания» приобретает качественное значение. Выбор «лучшей» альтернативы (МППСС: «наилучшим образом поможет предотвратить столкновение») основывается на состояниях своего и встречного(ых) судна(ов). Принимая решение в системе нечетких лингвистических переменных решение тоже будет нечетким, качественным. МППСС-72 решает эту проблему введением такой терминологии как «обычная и хорошая морская практика», которые позволяют сужать количество альтернатив. Такой подход вполне приемлем для принятия решений человеком, но плохо реализуем ЭВМ. Но несмотря на нечеткости и неопределенности МППСС-72, имеется множество работ, в которых использованы различные подходы к планированию маневра расхождения с учетом МППСС-72. Однако в этих многочисленных исследованиях решение ЗПР_{ПСС} ограничивается работой планировщика вне среды или в очень упрощенной среде. В Таблице 1 показано сравнение некоторых современных подходов для реализации алгоритмов ПСС, с учетом МППСС-72 для МАНС, в хронологическом порядке [7-22]. Эти разные подходы оценивались по выполнению пяти требованиям: соответствие МППСС-72 (указывается степень выполнения: нет, низкая, средняя или высокая), расхождение со статическими и динамическими препятствиями, учет ветра, течений, волнения и время вычислений. Вычислительное время имеет свою собственную шкалу оценки, где время может быть очень низким (миллисекунды),

низким (секунды), средним (несколько или десятки секунд) или высоким (сотни секунд).

Таблица 1

Сравнение предлагаемых подходов к задаче предупреждения столкновений судов

Метод	ӨEP/N++	LOSC AN	EA	FL	CPP	VO	ACO	MPC	TBA	APF
Автор	Smierzchalski, Michalewicz	Wilson	Tam and Bucknall,	Perera	Tam and Bucknall	Kuwata	Lazarovska	Johansen	Lazarovska	Lyj
Год	2000	2003	2010	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2019
Соответствие МППСС-72	нет	нет	низкое	среднее	среднее	высокое	высокое	высокое	высокое	высокое
Вычислительное время	среднее	?	высокое	?	низкое	низкое	среднее	высокое	низкое	Очень низкое
Расхождение со статическими препятствиями	неправильные формы	нет	круг	нет	нет	да	полигоны	нет	выпуклый многоугольник	Множество кругов
Расхождение с динамическими препятствиями	много	1	4	3	1-4	4	4-7	много	3-5	много
Учет ветра, течений, морского волнения	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет

Однако в настоящее время не реализован ни один из подходов из таблицы 1. Проблема реализации заключается в том, что ни одно из исследований в полной мере не охватывает весь спектр проблем/предлагаемых решений/алгоритмов необходимых для системного интеллектуального планирования траектории движения МАНС для целей ПСС.

Системное представление задачи планирования траектории расхождения судов

С учётом указанных особенностей ПСС целесообразно задачу планирования траектории декомпозировать на: 1) стратегическое; 2) тактическое; 3) детальное планирование [23]. Стратегическое планирование будет основываться на использовании лучшего графоаналитического метода с учетом МППСС-72 для достижения цели – расхождения на безопасном расстоянии с одним или множеством судов (см. Таблицу 1). На этапе тактического планирования в метод вносятся данные о внешней среде – пространстве, в котором будет осуществляться ПСС: острова, навигационные опасности, глубины, данные, полученные от крупнейших служб гидрометеорологического мониторинга [24]. Эта информация может быть отображена в ЭКНИС в виде наборов информационных наложений на векторную

электронную карту (ВЭК), таких как: радиолокационное информационное наложение (РИО), АИС информационное наложение (АИС ИО), Адмиралтейское информационное наложение (АИО), НАВТЕКС наложение и др. Покажем структуру морских информационных наложений в ЭКНИС на этапе тактического планирования для ЗПП_{ПСС} на рисунке 1.

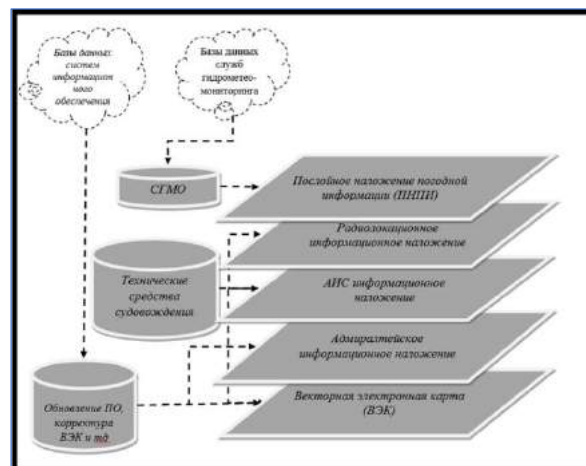


Рис. 1. Структура морских информационных наложений на этапе тактического планирования

Однако ВЭК не отображает такие природные явления, как видимость, день/ночь, сезонные изменения природы, маневренные особенности судна и др. Поэтому детальное планирование траектории должно дополняться факторами динамических особенностей природы и самого судна. Многоэтапное планирование [23] предполагает возможность совместимости результатов работы на каждом этапе. Но не каждый алгоритм планирования может это обеспечить. Казалось бы, что общее представление о районе плавания, предоставляемое ВЭК, достаточно для осуществления обобщенного планирования траектории движения судна. Однако современные исследования должны быть сосредоточены на реализации автономного целенаправленного движения на этапе детального планирования через неструктурированные среды «реального мира», которые не были специально заранее подготовлены для них во время разработки алгоритмов стратегического и тактического планирования.

Возможны ситуации, когда малое МАНС рассчитало маневр расхождения по МППСС на этапах только на первых двух этапах планирования. А неучет особенностей самого МАНС и окружающей среды на этапе детального планирования может привести к потере остойчивости и опрокидыванию судна при маневрировании в штормовых условиях в случае попадания его на гребень волны. Таким образом, необходимость автоматизации сбора разнородной детальной информации в реальном времени представляет собой основную проблему для интеллектуального планирования траектории движения и маневрирования МАНС.

Сбор данных в режиме реального времени

Мониторинг ПСС – это непрерывный процесс наблюдения и регистрации параметров и сравнение их с заданными критериями безопасности в режиме реального времени [25]. Технологии мониторинга и контроля основаны на сборе данных от измерительных систем (сенсоров) (СС) в режиме реального времени. Сведения от всех СС передаются в единую базу данных и совместно обрабатываются. Работающая в автоматическом режиме система позволяет выполнять циклы измерений с высокой скоростью и исключать ошибки, связанные с человеческим фактором. Промежутки между циклами измерений могут составлять от нескольких миллисекунд до нескольких минут. В списке задач при разработке Системы автоматического мониторинга и контроля (САМК) это – выбор необходимых датчиков, разработка методов качественного анализа собранных результатов и соединение их в общую сеть.

На рисунке 2 приведена упрощенная схема САМК, включающая входные данные (сенсоры) от систем позиционирования, датчиков навигационной обстановки, системы связи, системы взаимообмена информацией, системы точного времени, операционной системы (ОС) обеспечивающей требуемый уровень сервиса в заданный промежуток времени, а также выходные данные поступающие в систему управления судном (СУС): Главный двигатель (ГД), Рулевое устройство (РУ) и

Подруливающие устройства (вспомогательные системы управления судном) (ПУ).

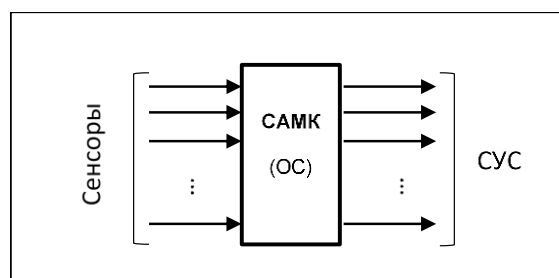


Рис. 2 – Упрощенная схема САМК реального времени

Обычно, в некотором географическом районе плавания одновременно могут находиться $\{M\}$ судов. Тогда для решения ЗПР_{ПСС} необходим мониторинг не за одним, а за множеством судов. По оценке векторов их относительного движения в некотором районе плавания $\{\{\vec{B}_m(c)\}; \text{где } m \in M = \{1, \dots, M\}\}$ – множество взаимодействующих судов, с - ограничения окружающей среды) определяют опасность столкновения судов. Структурную динамику перехода из безопасного в опасное состояние можно описать j -ым вектором «опасности столкновения» для i -го судна: $[b_{ji}(\bar{c}_{ji})]$ для которого определены пороговые значения $[\tilde{b}_{ji}(\bar{c}_{ji})]$ такие, что:

$$\begin{aligned} \text{Если } [b_{ji}(\bar{c}_{ji})] > [\tilde{b}_{ji}(\bar{c}_{ji})], \text{ то } [b_{ji}(\bar{c}_{ji})] &= 1 \\ \text{Если } [b_{ji}(\bar{c}_{ji})] < [\tilde{b}_{ji}(\bar{c}_{ji})], \text{ то } [b_{ji}(\bar{c}_{ji})] &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

«Опасность столкновения» существует, когда пороговое значение определяется как 1, и если 0, то «опасности столкновения нет». в ЗПР_{ПСС} этап наблюдения за судами, распределенными в некотором географическом пространстве и определение опасности столкновения судов активируется по шагу часов реального времени (временной контроль, протокол ТТ). При обнаружении факторов существования опасности столкновения САМК реконфигурируется на решение задачи расхождения с одним судном или с группой судов (ситуационное управление, протокол ЕТ). После завершения маневра, когда «суда чисто разошлись», система вновь возвращается к решению задачи мониторинга по протоколу ТТ. Следовательно, в САМК первостепенное значение имеет только то подмножество переменных состояний, которое важно для решения целевой задачи ПСС, существующей в данный момент времени. Такие переменные являются так называемой сущностью реального времени (a real-time (RT) entity). Поскольку состояние судна зависит от реального времени, то данное компьютерное RT-изображение является точным только для ограниченного интервала времени. Длина этого временного интервала зависит от динамики судна. Если состояние судна изменяется очень быстро, соответствующее RT-изображение имеет очень короткий интервал точности. Набор всех точных во времени изображений в реальном времени составляет базу данных реального времени. База данных реального времени обновляется всякий раз, когда изменяется сущность реального времени.

Технические системы для решения задачи предупреждения столкновения судов

Технические системы для решения ЗПР_{ПСС} относятся к изделиям ответственного назначения. Их предназначение – эксплуатация на объектах с повышенным уровнем опасности. Из перечня [2] п. 9.1.2.8 это РЛС, АИС, ГНСС, ЭКНИС, ИНС и др. Исходной информацией для рассматриваемой задачи мониторинга во времени могут быть элементы пути судна-цели в САРП: курс и скорость ($K(t), V(t)$) или обсервованные ГНСС-координаты ($\varphi_0(t), \lambda_0(t)$), полученные с помощью АИС. Возникает необходимость анализа точности и надежности получаемых данных на этапе разработки концепции САМК. Так как уровень ситуационной осведомленности при решении ЗПР_{ПСС} определяется в режиме реального времени (РВ), то связующей основой всех процессов ПСС, связанных напрямую или косвенно является - время.

В типичном приложении реального времени (РВ) распределенная компьютерная САМК одновременно выполняет множество различных функций. Эти разнообразные функции обычно выполняются в разных узлах. Чтобы гарантировать согласованное поведение всей распределенной САМК, необходимо обеспечить, чтобы все узлы обрабатывали все события в одном и том же согласованном порядке, предпочтительно в том же временном порядке, в котором ведется наблюдение или обнаружена опасность столкновения.

В САМК осуществляющей сбор информации во времени (ТТ) обычным требованием является наличие часов, синхронизированных с внешними реальными часами или опорными часами системы в пределах допустимых значений. Всемирное координированное время (Universal Time Coordinated – UTC) хранит время на основе атомных часов с необходимыми поправками на вариации вращения Земли. К значению часов UTC можно получить доступ через спутники ГНСС. Спутник ГНСС передает свое положение с отметкой точного времени.

Проблема единого времени на современном этапе разработки концепции МАНС заключается в том, что поставляемые приемники ГНСС не предназначены для построения распределенных систем единого времени, отсутствует простая возможность выравнивания времени, а механизмы синхронизации времени не адаптивны к ГНСС и не позволяют контролировать точность текущей синхронизации.

Для работы в режиме РВ и синхронизации всех узлов распределенной системы САМК автономное судно должно иметь в своей структуре Систему единого времени (сервер времени) (СЕВ). СЕВ должна быть предназначена для синхронизации частотно-временных показателей. Принимая сигналы со спутников глобальных систем позиционирования GPS и ГЛОНАСС или входных модулей, сервер подстраивает внутренний опорный генератор, после чего с высокой точностью формирует сигналы частоты точного времени и синхронизирует временные параметры в распределенной системе сбора информации. Сервер времени может работать с применением различных специализированных сигналов и

протоколов, включая NTP (Network Time Protocol) и PTP (Precision Time Protocol) протоколы. Эти два средства покрывают широчайший спектр конфигураций, поскольку NTP ориентирован на протяженные линии связи, а PTP адаптирован к локальным сетям, для которых характерна малая задержка и высокая скорость передачи. Учитывая тенденцию перевода общесудовых сетей обмена данными с технологии последовательных шин на более современную технологию локальных сетей Ethernet и TCP/IP, в СЕВ должно использоваться гибридное решение с использованием NTP и PTP, позволяющее производить синхронизацию по времени во всех узлах локальной сети.

Общая шкала времени при решении ЗПР_{ПСС} — одна из основ единого информационного пространства одиночного судна или группы судов. Отсутствие синхронизации времени не может обеспечить выработку и реализацию решения по расхождению автономных судов. Таким образом, ставится задача реализации СЕВ. Необходимо обеспечить МАНС общесудовыми сетями передачи данных таким образом, чтобы интегрировать функцию распространения единого времени с использованием NTP и PTP протоколов для синхронизации по времени всех узлов локальной сети.

Сенсорные системы для мониторинга окружающей среды, обнаружения судов и объектов на море.

Сенсорные системы для ПСС, предназначенные для мониторинга морской среды, должны обнаруживать суда, объекты и опасности не только на водной поверхности, но и под водой. СС можно разделить на локальные и глобальные. Судовые локальные СС получают, обрабатывают и хранят информацию с отображением результатов обработки на электронной карте в пределах некоторого географического района плавания. Судовые глобальные СС обеспечивают судно данными о всемирном времени, положении МАНС, информацией и изображениями доступными из самых разных источников.

Судовые РЛС в настоящее время являются основными локальными СС обеспечивающими навигационную безопасность плавания в условиях хорошей и ограниченной видимости, а РЛС с функцией САРП наделены автоматическим захватом, сопровождением и непрерывным автоматическим определением элементов движения (курса и скорости), а также элементов сближения (дистанции и времени кратчайшего сближения) всех сопровождаемых целей. Наиболее важной функцией для целей ПСС является функция слежения за судами-целями. Слежение за траекториями целей заключается в непрерывной привязке вновь полученных отметок к своим траекториям, в сглаживании координат и вычислении параметров движения целей.

Основными данными, определяющими траекторию движения цели, являются координаты отметки цели, изменение которых соответствует закону ее движения. САРП накапливает поступающую информацию по каждой из сопровождаемых целей, преобразует полярные координаты (пеленг-дистанция) в прямоугольные

(X, Y) и получает линию движения цели (ЛДЦ) в прямоугольной системе координат.

По требованию ИМО круговая скорость вращения судовых антенн должна быть не менее 20 об/мин. Параметры судна-цели (пеленг и дистанция) измеряются за время одного оборота антенны РЛС путем усреднения погрешностей параметров, полученных при обработке пачки импульсов, отраженных от цели. Захват цели может быть произведен в автоматическом режиме. Алгоритм САРП построен в рекуррентном виде и обеспечивает текущее слежение за координатами цели $(X_{ц}, Y_{ц})$ и скоростями изменения координат цели $(V_{ц,x}, V_{ц,y})$.

Работа следящей системы основана на обработке следующей оценке координат и скоростей из предыдущих измерений:

$$\begin{aligned} X_{ц,m}^* &= X_{ц,m-1}^* + V_{ц,x,m-1}^* + A(X_{ц,m} - X_{ц,m-1}^* - V_{ц,x,m-1}^*) \\ Y_{ц,m}^* &= Y_{ц,m-1}^* + V_{ц,y,m-1}^* + A(Y_{ц,m} - Y_{ц,m-1}^* - V_{ц,y,m-1}^*) \\ V_{ц,x,m}^* &= V_{ц,x,m-1}^* + B(X_{ц,m} - X_{ц,m-1}^* - V_{ц,x,m-1}^*) \\ V_{ц,y,m}^* &= V_{ц,y,m-1}^* + B(Y_{ц,m} - Y_{ц,m-1}^* - V_{ц,y,m-1}^*) \end{aligned} \quad (2)$$

Параметры со «звездочкой» представляют собой оценки измеряемых параметров за t и $t - 1$ оборотов антенны, параметры без «звездочек» - единичные измерения параметров за t - ый оборот антенны. Так как информация поступает с погрешностями, полученные точки имеют определенный разброс и для получения прямой ЛДЦ обрабатываются по способу наименьших квадратов, т. е. сглаживаются. Коэффициенты A и B в формуле (2) - коэффициенты сглаживания. На основе сглаживания рассчитывается наиболее вероятная прямолинейная траектория движения цели и оценивается постоянная скорость движения цели по этой траектории. Исходя из постоянства ЭДЦ рассчитываются курс и скорость цели (истинный и относительный) и пред вычисляются параметры расхождения - дистанция и время кратчайшего сближения $(D_{кр}, T_{кр})$ по формулам:

$$\begin{aligned} D_{кр.} &= \frac{X_{ц}V_{ц,y} - Y_{ц}V_{ц,x}}{V_{ц}\Delta t}; \\ t_{кр.} &= \frac{X_{ц}V_{ц,x} - Y_{ц}V_{ц,y}}{V_{ц}^2\Delta t} \end{aligned} \quad (3)$$

Алгоритм сглаживания должен обеспечить максимальную точность выходных данных за минимальный интервал времени и максимально быстрое обнаружение маневра цели. Так как эти требования являются взаимоисключающими, в САРП обычно предусматривается два режима работы - переходный и установившийся. При переходном режиме происходит непрерывное накопление и уточнение данных, поэтому коэффициенты сглаживания постепенно уменьшаются от максимальных значений (когда учитываются только несколько последних измерений) до установленного минимума, а в установившемся режиме коэффициент остается постоянным (что определяет и постоянство точностных характеристик САРП). Например, в модели JRC JMA-9133-SA первые вычисления ЛДЦ выполняются через 21 с. Однако модель JMA-9133-SA обеспечивает уверенное автосопровождение целей, в соответствии с инструкцией по эксплуатации, только по истечении 3 минут после захвата цели.

Основной недостаток традиционно используемых на морском флоте РЛС S- и X-диапазонов не обеспечивают разрешающую способность, достаточную для решения задач ПСС при скоплении множества судов в проливах, в припортовой зоне, на достаточно близкой дистанции при расхождении судов и достаточно низкую точность особенно в дождь и волнении моря. Цели сливаются, невозможно раздельное их наблюдение, происходит потеря параметров их движения.

Этого недостатка лишены лидары. Принцип действия лидара такой же как РЛС. Только лидар использует лазерные лучи для определения положения, скорости и других характерных величин целей. Например, Leica ScanStation P50 — это лидар дальнего действия, который генерирует до 1 миллиона точек в секунду и имеет максимальную дальность измерения более 1 км (для 80% отражательной способности цели), минимальную дальность 0,4 м, точность дальности 1,2–3 мм, горизонтальное поле зрения 360°, вертикальное поле зрения 290° и угловая точность по горизонтали и вертикали 8 дюймов. Однако современные лидарные системы пока не могут использоваться для ПСС на больших расстояниях. Основным недостатком - лидар опасен для зрения человека. Радары превосходят лидарные технологии благодаря своей способности обнаруживать объекты на больших расстояниях и лучше работать в плохих погодных условиях, таких как дождь, туман, волнение или снег. С другой стороны, в отличие от радара, лидар более точен и детален при измерении, а также может обнаруживать неметаллические объекты, такие как суда из дерева или пластика. Поэтому лидар может успешно использоваться для целей ПСС только на ограниченной водной акватории (проливы, порты и др.) со скоплением разнородных судов и плавающих объектов. Другое направление использования лидаров - наблюдение за водной поверхностью с целями охраны МАНС, а также швартовых операций в порту или в море.

Как видно из-за различий и сходства в обнаружении судов и объектов на море одна система не может заменить другую, поэтому для достижения наилучших возможных результатов во многих исследованиях предлагается комбинация систем - интеграция различных датчиков в единую систему, которая должна обеспечивать ситуационную осведомленность МАНС в сочетании с методами искусственного интеллекта (ИИ). Сочетание датчиков направлено на получение более точной, надежной и полной информации по сравнению с информацией, получаемой от отдельного источника индивидуально.

Система ситуационной осведомленности должна обладать информацией об опасностях не только на водной поверхности, но и под водой. Информацию об опасностях под водой можно получить с помощью данных навигационных карт с различной степенью доверия. Однако некоторые карты могут иметь устаревшую информацию о глубинах, которым уже несколько лет, десятилетий или даже столетий. Навигационные карты также не учитывают влияние сезонных явлений, приливных течений в прибрежном плавании или на мелководье. Здесь течения могут развивать значительные скорости, размывать дно, образовывать желобообразные или руслообразные

формы рельефа, а также подводные аккумулятивные формы: песчаные гряды и песчаные волны. Эти явления, связанные с изменением глубин, наблюдаются в оживленных судоходных районах, проливах и на подходах к портам, находящимся в эстуариях крупных рек. Следовательно МАНС должны обладать способностью компенсировать пробелы в знаниях о имеющихся глубинах и опасностях под водой за счет своих сенсорных возможностей для непосредственной оценки конфигурации морского дна в режиме реального времени. Для этого необходимо использовать эхолоты и гидролокаторы бокового обзора, либо по отдельности, либо вместе в одном блоке, чтобы обеспечить возможность отслеживания опасностей морского дна с отображением на ЭКНИС обнаруженных опасностей и препятствий.

Обязательным для МАНС должен быть комплект метеоприборов, интегрированных в общую систему датчиков. Они должны предоставлять данные в режиме реального времени о скорости и направлении ветра, температуре, барометрическом давлении, влажности и температуре моря, что жизненно важно для бортовой системы ситуационной осведомленности, позволяющей обнаруживать и компенсировать влияние ветра, течений и других явлений на протяжении всего автономного рейса. Комбинация локальных СС мониторинга за водной поверхностью таких как: лазерная визуализация, миллиметровый радар, видео и инфракрасные камеры, микрофоны могут обеспечить новые и избыточные возможности для ПСС. Визуальные датчики могут быть дополнены радаром и передним навигационным гидролокатором для подтверждения местоположения судов на ЭКНИС в режиме реального времени.

В последние годы расширились возможности представления и обработки информации об

окружающей среде с помощью спутников. Многие спутники могут предоставлять точную информацию о местоположении и времени. Другие спутники используются для сбора метеорологических и океанографических (МЕТОС) и наземных изображений. Информация со спутников может быть трех видов: пиксельная, временная и частотная, которая отображает окружающую среду по-разному.

Комбинация выше рассмотренных локальных и глобальных СС позволит получить гораздо большее информационное содержание об окружающей среде, чем это было возможно ранее.

В рассматриваемой СПСС информацию о судах можно получить с помощью Автоматической идентификационной системы (АИС). АИС – это автоматическое приемопередающее устройство, работающее в УКВ диапазоне, способное осуществлять оперативный обмен данными между судами и береговыми станциями. Основным назначением и главной функцией бортовой аппаратуры АИС.

является предупреждение столкновений судов. АИС выдает координаты судна с признаком точности менее или более 10 метров. АИС на судах позволяет реализовать явные преимущества по надежности, достоверности идентификации судов в сравнении с РЛС с функцией САРП. АИС практически сводит к нулю влияние помех от морской поверхности и атмосферных явлений. АИС позволяет автоматически получать от судна необходимые данные (координаты, скорость, направление движения и др.), причем с большей точностью, чем у РЛС, что позволяет уменьшить задержку в распознавании маневра судна. Динамическая информация передается в зависимости от скорости судна и изменения его курса. Интервал передач задается в соответствии с таблицей 2 «Сообщение о местоположении».

Таблица 2

Интервал передач динамической информации

Динамическое состояние судна	Интервал между сообщениями
Судно на якоре, на швартовых или движущееся со скоростью менее 3 узлов	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	3,33 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

Для большинства движущихся судов период передачи изменяется от 10 до 2 секунд, то есть, соизмерим с периодом обновления радиолокационной информации (2 – 4 секунды), определяемым частотой вращения антенны РЛС. Преимущества АИС перед РЛС заключаются прежде

всего в автоматизированном обмене сообщениями, связанными с безопасностью мореплавания, между судами и береговыми службами, возможности фиксации динамической информации по времени (таблица 3).

Таблица 3

Содержание динамической информации

Вид и содержание информации	Особенности информации
Координаты судна	Автоматически считываются с датчика местоположения, подключенного к аппаратуре АИС
Время определения координат	Время по шкале UTC. Автоматически считывается с датчика местоположения, подключенного к аппаратуре АИС
Путевой угол, путевая скорость (относительно грунта)	Автоматически считывается с датчика местоположения, подключенного к аппаратуре АИС. (COG – Course over ground / SOG – Speed over ground)
Курс	Автоматически считывается с судового курсоуказателя (гироскопаса), подключенного к аппаратуре АИС
Угловая скорость	Скорость поворота (изменения курса). Автоматически считывается с соответствующего датчика, если он имеется на судне

По таблице 3 последовательность наблюдений за судами будет складываться во времени сразу из нескольких величин, получаемых АИС. Однако, хотя АИС и предназначена для целей ПСС, но АИС не предоставляет ЛОД и $(D_{кр}, T_{кр})$. Поэтому в настоящее время судоводители, несмотря на низкую точность и вычислений РЛС/САРП по сравнению с информацией представляемой АИС, используют в основном информацию РЛС/САРП. Основанием для этого является наглядность, возможность проигрывания маневра и рассчитанные

в автоматическом режиме критерии безопасного расхождения судов.

Тем не менее существенных результатов автоматического прогнозирования движения судна-цели по надежности, точности, скорости вычислений можно достигнуть при изучении отдельно взятого временного ряда $(\varphi_{ц}, \lambda_{ц})$ в соответствии с периодом передачи информации станцией АИС (таблица 2) для определения ЛОД и $(D_{кр}, T_{кр})$. Контрольные участки (периоды) приема динамической информации покажем в таблице 4.

Таблица 4

Контрольные участки (периоды) приема динамической информации АИС и ГНСС

Источник информации	Время (с)										
	Скорость судна (уз)	1	2	3,33	4	5	6,66	7	8	9	10
АИС	3-14										*
	0-14 (К)			*			*			*	
	14-23						*				
	14-23 (К)		*		*	*	*	*	*	*	*
ГНСС	-	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Динамика временного ряда наблюдений $(X(t))$ судна-цели по АИС (таблица 4) представляется нестационарным временным рядом с разным шагом дискретизации (Δt) , а это создаёт существенную проблему при ее анализе для целей ПСС. Частота передачи информации ГНСС фиксирована (каждую 1 с.), а передача информации АИС изменяется в зависимости от скорости судна (см. Таблицу 4). В целом наблюдение за движением судна-цели можно описать криволинейным *равномерным движением* на случайных кусочно-интервальных отрезках времени, протекающих приблизительно однородно и имеющих вид непрерывных случайных колебаний курса и скорости $(K_{ц}, V_{ц})$ вокруг некоторого значения заданного локсодромического курса (K_3) . В тех же

условиях среды движение судна-цели можно описать *неравномерным криволинейным движением*, которое характеризуется тем, что численное значение скорости движения изменяется и может быть ускоренным или замедленным. Изменение скорости судна-цели влечет и изменение Δt , который может происходить в моменты торможения, разгона или в моменты маневрирования судна. То есть в моменты времени, указанные в таблице 4 происходит значительное изменение динамических свойств временного ряда. В результате скачков Δt исходный временной ряд разбивается на сегменты, которые соответствуют разным динамикам процесса. Момент перескока дискретного временного ряда места судна-цели по АИС может быть определен непосредственно на рисунке 3.

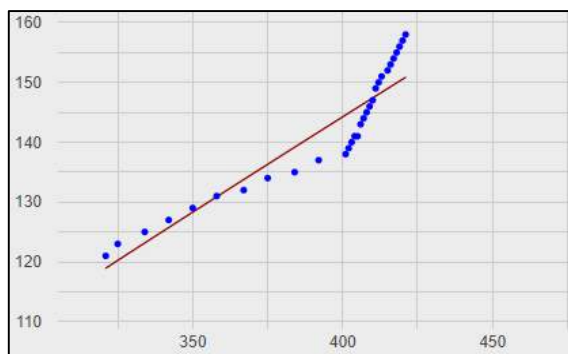


Рис. 3 – Скачок Δt временного ряда места судна-цели

Стандартные процедуры локального (во времени) анализа временного ряда наблюдений $x[1:N_0]$ предусматривают его сегментирование посредством сдвига временного окна фиксированной длины $N \ll N_0$ ($N\Delta t$ - определяет временной масштаб для локального анализа этого нестационарного временного ряда). При этом во многих исследованиях неявным является предположение о локальной стационарности временных рядов.

Предполагается, что значение N может быть выбрано так, чтобы обеспечить квазистационарность последовательных сегментов $x[n:n+N-1]$, где $[n:n+N-1] \subset [1:N_0]$. Имеются и другие подходы, например подход с использованием модели локально-переходного изменения, который не столь широко распространен для определения локальной во времени динамики систем на основе нестационарных временных рядов. Модель локально-переходного изменения характеризует временные интервалы, в которых нарушается локальная стационарность временного ряда.

Нужны подходы для обработки временных рядов АИС связанные с пропускной способностью системы. Рост количества судов, оснащенных аппаратурой системы АИС, а также востребованность передачи сообщений, длина которых может достигать пяти временных слотов привели к перегрузке каналов АИС в районах с интенсивным трафиком и, как следствие, к снижению безопасности море. На рисунке 4 демонстрируется временной ряд с потерей информации и скачками места судна-цели.

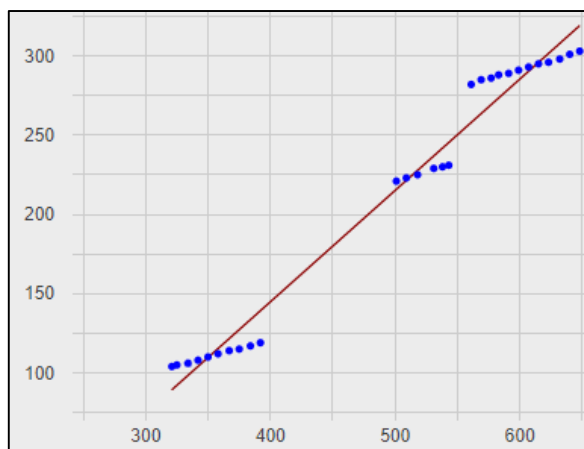


Рис. 4 – Потеря информации и скачки места судна-цели

В 2006–2008 гг. ряд стран — членов Международной ассоциации маячных служб (МАМС), предвидя увеличение загрузки каналов АИС, стала искать пути решения проблемы. В последние годы Международная морская организация (ИМО) и МАМС начинают внедрять Концепцию е-Навигации, одним из компонентов которой является автоматическая система обмена данными (АСОД/VDES). АСОД/VDES использует диапазон частот морской подвижной службы (156–162 МГц). Наряду с наземным сегментом, в системе АСОД/VDES предусмотрен низкоорбитальный спутниковый сегмент. АСОД должна выполнять функции: автоматической идентификационной системы; поддерживать сервис применения специальных сообщений (ASM) и производить обмен информацией по наземным (VDE1) и спутниковым каналам связи (VDE-SAT). Для передачи данных с большей скоростью в диапазоне ОБЧ предложено использовать каналы связи с характеристиками (VDE: VHF Data Exchange), что позволяет достичь скоростей 300 кбит/с. Комплекс из нескольких потоков данных (AIS, ASM, VDE) сейчас объединяется в единую систему морской связи (VDES) или Автоматическую систему обмена данными (АСОД). Основными задачами АСОД является: непрерывное информационное обеспечение судовождения со стороны береговых служб (вплоть до обеспечения безэкипажного судовождения), призванное повысить безопасность мореплавания, а также автоматическая передача от судов другим судам и береговым службам навигационной, рейсовой и другой требуемой различными морскими регламентами информации.

Обеспечение надежности и повышение точности информации

Ключевыми факторами МАМС являются надежность технических систем и точность параметров для решения ЗПР_{ПСС}. Надежность может быть обеспечена методами резервирования за счет избыточности средств. Структурная избыточность предусматривает введение дополнительных элементов, узлов, устройств либо даже вместо одной системы предусматривается использование нескольких идентичных систем. Структурное резервирование подразделяют на активное и пассивное. Активное резервирование означает перестройку системы, а при пассивном резервировании перестроения структуры не происходит. Резервирование в МАМС может быть построено по смешанной схеме. Где наряду со структурной перестройкой системы датчиков, могут подключаться схемы функционального резервирования. При функциональном резервировании датчики могут выполнять свои функции только временно. Это может сопровождаться некоторым ухудшением качества значений параметров, но в допустимых пределах. При функциональном резервировании в системе нет «лишних» элементов, так как все датчики необходимы для выполнения заданных функций.

Наряду с резервированием должен использоваться подход, связанный с комплексированием. Под комплексированием понимается объединение датчиков в комплексную систему, осуществляющую совместную обработку

информации и обеспечивающую повышение точности измерений. Задача состоит в том, чтобы собрать множество датчиков, регистрирующих параметры из различных предметных областей в систему датчиков таким образом, чтобы они удовлетворяли ПСС по надежности и точности параметров для решения различных ЗПР_{ПСС}. Сочетание датчиков предполагает интеграцию и анализ данных от средств обнаружения и представляет собой процесс сбора и обобщения данных по определению местоположения и идентификации, полученных от различных датчиков, в целях получения единой комплексной картины окружающей обстановки.

Приведем пример комплексирования ГНСС и Инерциальных систем (ИНС). Глобальные системы позиционирования МАНС (ГНСС) наиболее подвержены влиянию тропосферных, ионосферных помех. Проблема ГНСС на МАНС для создания

автономных систем навигации, удовлетворяющих совокупности требований в части глобальности, точности, скрытности и помехозащищенности решается на пути создания корреляционно-экстремальных систем навигации с комплексным использованием информации о поверхностных и пространственных геополях. Недостатком ГНСС является их зависимость от условий приема и помех. Недостатком ИНС является накопление навигационной ошибки, величина которой зависит как от инструментальных ошибок измерительных датчиков, так и методов обработки доставляемой информации (таблица 5). Для устранения этого недостатка ИНС необходимо периодически корректировать, вводя корректирующие значения, что делается с помощью ГНСС. Поэтому целесообразно использовать эти системы комплексно.

Таблица 5

Основные характеристики ИНС и ГНСС

Параметр	ИНС	ГНСС
Автономность	Да	Нет
Привязка к центральным эталонам (системе координат и времени)	Нет	Есть
Шумовая погрешность	Низкая	Высокая
Накапливающаяся погрешность, необходимость калибровки	Да	Нет
Помехоустойчивость	Высокая	Низкая
Перерывы навигационных измерений, обусловленных внешними факторами	Нет	Есть
Темп выдачи данных	Высокий	Низкий
Возможность резервирования	Эффективная	Неэффективная

Существуют различные схемы комплексирования ГНСС и ИНС: раздельная, слабосвязанная, жестко связанная, глубоко интегрированная. Применение в комплексе ГНСС и ИНС позволяет повысить устойчивость к внезапным изменениям режимов работы, а также точность параметров местоположения, скорости, курса судна.

В настоящее время проводятся многочисленные исследования не только комплексирования ГНСС и ИНС, но сочетания различных типов датчиков из различных предметных областей. Некоторые примеры: совмещение ЭКНВИС с радиолокационным изображением (РЛИ), формируемым бортовой РЛС при функционировании ее в режимах высокого и сверхвысокого разрешения, совмещение цифровых карт местности с радиолокационным изображением (РЛИ), объединение корабельной инфракрасной системы поиска и сопровождения (infrared search-and-track – IRST) и многофункциональной РЛС, сочетание радиолокационных датчиков, функционирующих в разных диапазонах длин волн. В таблицах 6 – 8 покажем типы датчиков и классы данных морских надводных, подводных и спутниковых систем, данные которых могут

использоваться для сочетания датчиков при решении ЗПР_{ПСС}.

Перечисленные системы в таблицах 6 – 8 не являются исчерпывающим списком для планирования траектории и решения ЗПР_{ПСС}.

Исследования по комплексированию датчиков проводятся в различных особо ответственных областях: космос, авиация, военное дело, разведка, в том числе и для целей ПСС. Предмет исследования для целей ПСС заключался в объединении данных бортовых датчиков с информацией, содержащейся в навигационных картах, местных извещениях для мореплавателей, приливах и течениях и другой информации, относящейся к ПСС. Существенным для анализа различных изображений и сигналов являлось создание больших и разнообразных наборов данных, представляющих объекты и формы сигналов. Эти наборы данных состояли из двух частей: полного и ограниченного набора данных, которые в последствие использовались при обучении нейронной сети. Эксперименты показали хорошие результаты, а комбинация датчиков для достижения всесторонней ситуационной осведомленности ПСС оказалась эффективной при планировании расхождения судов в режиме реального времени.

Таблица 6

Типы датчиков и классы данных морских надводных технических средств судна

ТСС	Тип сенсора	Класс данных	Предметная область			Содержание данных				Входит в перечень ИМО
			Пиксели	Время	Частота	Идентификация	Положение	Курс	Скорость	
АИС	Передачик	Цифра	Нет	Да	Нет	Да	Да	Да	Да	Да
ЭКНИС	Вектор	Цифра	Да	Да	Да	Нет	Да	Да	Нет	Да
ИНС	Инструмент.	Цифра	Нет	Да	Да	Нет	Да	Да	Да	Нет
Лидар	Инструмент.	Изображение	Да	Да	Нет	Нет	Да	Да	Да	Нет
РЛС/САР П	Передачик	Изображение/Сигнал	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да
Миллиметровый Радар	Передачик	Изображение/Сигнал	Да	Да	Да	Нет	Да	Нет	Да	Нет
Видео камера	Приемник	Изображение	Да	Да	Да	Косвенно	Да	Косвенно	Косвенно	Нет
Инфракрасная камера	Приемник	Изображение	Да	Да	Нет	Косвенно	Да	Косвенно	Косвенно	Нет
Аудио/Звук	Приемник	Сигнал	Нет	Да	Да	Косвенно	Да	Косвенно	Косвенно	Да

Таблица 7

Типы датчиков и классы данных морских подводных технических средств судна

Эхолот	Передачик	Изображение/Сигнал	Некоторые	Да	Да	Нет	Да	Да	Нет	Да
Навигационный сонар	Передачик	Изображение/Сигнал	Да	Да	Да	Косвенно	Да	Косвенно	Косвенно	Нет
Сонар бокового обзора	Передачик	Изображение/Сигнал	Да	Да	Да	Косвенно	Да	Косвенно	Косвенно	Нет

Таблица 8

Типы датчиков и классы данных морских спутниковых

ГНСС	Приемник	Цифра	Да	Да	Да	-	Да	Да	Да	Да
МЕТОС	Приемник	Изображение/Сигнал	Да	Нет	Нет	-	Косвенно	Нет	Нет	Да
Оптическое изображение	Приемник	Изображение	Да	Нет	Нет	-	Косвенно	Нет	Нет	Нет

Заключение

В статье дан анализ навигационных систем и методов повышения их надежности для решения задач предупреждения столкновений автономных

судов на этапе разработки концепции. Основной акцент был направлен на некоторые проблемы, нужды и требования, которые позволяют МАНС автономно, целенаправленно и надежно решать

ЗПР_{ПСС} в неструктурированных средах реального мира.

Общий подход к реализации ПСС заключается в том, чтобы «ощутить мир, построить модель мира», синтезировать план и создать последовательность действий в соответствии с МППСС-72 по отношению к судам-целям, а затем выполнить план с помощью системы управления главным двигателем и рулевым устройством. Этот подход обеспечивает достижение цели - расхождение судов на безопасном расстоянии. При этом, если некоторые алгоритмические модели с учетом МППСС-72 (например: искусственные потенциальные поля) уже могут быть приняты за основу при планировании расхождения судов, то модели окружающей среды, в которой взаимодействуют МАНС, не соответствуют требованиям по отображению полноты окружающей среды, а также используемые порознь не соответствуют критериям надежности и точности.

Проблемы создания модели окружающей среды связаны прежде всего с неполным и неопределенным знанием окружающей среды, непредсказуемыми аспектами реальной среды, ограничениями датчиков и неопределенностью сенсорной информации (диапазон, пределы разрешения, шум и др.), необходимость быстро реагировать на требования среды, в которой МАНС должно действовать в темпе, диктуемом взаимодействием с окружающей средой (ограничения времени вычислений из-за ограничений, налагаемых средой). Грубая модель среды может быть предоставлена на уровне

стратегического планирования. На этапе тактического планирования в метод вносятся данные о внешней среде – пространстве, в котором будет осуществляться ПСС. Однако полное представление о «картине реального мира» может быть получено только на этапе детального изучения района плавания по сенсорной информации МАНС, получаемой в режиме реального времени. Для этого нужны комплексы интегрированных надежных и точных систем. В статье показаны пути решения этих задач с использованием методов резервирования и комплексирования вызвана тем, что любой из датчиков МАНС подвержен влиянию помех, возникновению технических сбоев или изменению нормальных рабочих режимов. Для устранения такого рода проблем в статье рассматриваются методы слияния датчиков разнородных навигационных систем. Слияние датчиков осуществляется на основе нейронных сетей, осуществляющих совместную обработку информации и обеспечивающих повышение точности измерений. В результате комплексирования датчиков, взаимодополняющих друг друга формируются высокоинформативные обобщенные сведения об автономном судне и об окружающей среде для целей ПСС. Представленные в статье подходы позволяют разрабатывать концепцию МАНС с беспрецедентным уровнем обеспечения ситуационной осведомленности при решении ЗПР_{ПСС}.

Литература

1. Симанков, В. С. Основные методологические аспекты организации и функционирования систем поддержки принятия решений безопасности судоходства. В. С. Симанков, В. В. Астреин. Эксплуатация морского транспорта. – 2016. – № 2(79). – С. 56-64.
2. НД № 2-030101-037 Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС) Российского морского регистра судоходства, 2020
3. Maritime Safety Committee (MSC), 100th session, 3-7 December 2018 <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-100th-session.aspx>
4. MSC.1-Circ.1638 - Outcome of the regulatory scoping exercise for the use of maritime autonomous surface ships... (Secretariat).pdf
5. СОЛАС-74 = SOLAS 1974, на английском и русском языках, 2021- СПб.: ЗАО "ЦНИИМФ", 2021 г. - 1184 с.
6. Астреин, В.В. Основы интеллектуальных систем предупреждения столкновений судов (монография). Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 2014. 400 с.
7. Smierzchalski, R. and Michalewicz, Z. (2000). Modeling of ship trajectory in collision situations by an evolutionary algorithm. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 4(3), 227–241.
8. Szlapczynski, R. (2011). Evolutionary sets of safe ship trajectories a new approach to collision avoidance. The Journal of Navigation, 64, 169–181.
9. Wilson, P., Harris, C. and Hong, X. (2003). A line-of-sight counteraction navigation algorithm for ship encounter collision avoidance. The Journal of Navigation, 56(1), 111–121.
10. Zeng, X. (2003). Evolution of the safe path for ship navigation. Applied Artificial Intelligence, 17(2), 87–104.
11. Tam, C. and Bucknall, R. (2010). Path-planning algorithm for ships in close-range encounters. Journal of Marine Science and technology, 15(4), 395–407.
12. Tam, C. and Bucknall, R. (2013). Cooperative path planning algorithm for marine surface vessels. Ocean Engineering, 57, 25–33.
13. Perera, L. P., Carvalho, J. P. and Soares, C. G. (2011). Fuzzy logic-based decision-making system for collision avoidance of ocean navigation under critical collision conditions. Journal of Marine Science and technology, 16(1), 84–99.
14. Perera, L. P., Carvalho, J. P. and Soares, C. G. (2012). Intelligent ocean navigation and fuzzy-Bayesian decision.action formulation. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 37(2), 204–219.
15. Lee, S., Kwon, K. and Joh, J. (2004). A fuzzy logic for autonomous navigation of marine vehicles satisfying COLREG guidelines. International Journal of Control Automation and Systems, 2(2), 171–181.
16. Xue, Y., Clelland, D., Lee, B. and Han, D. (2011). Automatic simulation of ship navigation. Ocean Engineering, 38, 2290–2305.

17. Kuwata, Y., Wolf, M., Zarzhitsky, D. and Huntsberger, T. (2014). Safe maritime autonomous navigation with COLREGS, using velocity obstacles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 39(1), 110–119.
18. Lazarowska, A. (2015). Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony optimization. *The Journal of Navigation*, 68, 291–307.
19. Lazarowska, A. (2017). A new deterministic approach in a decision support system for ship's trajectory planning. *Expert Systems with Applications*, 71, 469–478.
20. Johansen, T. A., Perez, T. and Cristofaro, A. (2016). Ship collision avoidance and COLREGS compliance using simulation-based control behavior selection with predictive hazard assessment. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(12), 3407–3422.
21. Brcko, T., & Svetak, J. (2013). Fuzzy reasoning as a base for collision avoidance decision support system. *Promet-Traffic & Transportation*, 25(6), 555-564
22. Lyu, H. and Yin, Y. (2017). Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on modified artificial potential field. In 2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE), 351–357.
23. Большаков А. А., Степанов М. Ф., Степанов А. М., Ульянина Ю. А. Планирование траектории движения мобильного робота. *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2010. № 51. С. 176-180.
24. ВМО-№ 471. Руководство по морскому метеорологическому обслуживанию. - Женева, Швейцария, 2018. – 93 с.
25. Астреин, В. В. Положения и методы разработки автоматического мониторинга безопасности судовождения. В. В. Астреин, В. И. Филатов. *Морские интеллектуальные технологии*. – 2022. – № 3-1(57). – С. 188-197.
26. Астреин, В. В. Принципы автоматического мониторинга и контроля движения судна в режиме реального времени. В. В. Астреин, В. И. Филатов. *Морские интеллектуальные технологии*. – 2023. – № 1-1(59). – С. 158-168.

References

1. Simankov, V. S. Osnovnye metodologicheskie aspekty organizatsii i funktsionirovaniya sistem podderzhki prinyatiya resheniy bezopasnosti sudovozhdeniya [Key aspects of the methodology and functioning of decision support systems for navigation safety]. V. S. Simankov, V. V. Astrein. *Ekspluatatsiya morskogo transporta*. – 2016. – № 2(79). – С. 56-64
2. ND № 2-030101-037 Polozheniya po klassifikatsii morskikh avtonomnykh i distantsionno upravlyaemykh nadvodnykh sudov (MANS) Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva [Classification standards of Autonomous and remote-controlled vessels (MANS)], 2020
3. Maritime Safety Committee (MSC), 100th session, 3-7 December 2018 <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-100th-session.aspx>
4. MSC.1-Circ.1638 - Outcome of the regulatory scoping exercise for the use of maritime autonomous surface ships... (Secretariat).pdf
5. SOLAS-74 = SOLAS 1974, na angliyskom i russkom yazykakh [SOLAS Russian and English revision], 2021- SPb.: ZAO "TsNIIMF", 2021 g. - 1184 s.
6. Astrein, V.V. Osnovy intellektual'nykh sistem preduprezhdeniya stolknoveniy sudov (monografiya) [Basics of intellectual systems for prevention vessel's collision]. Lambert Academic Publishing, Saarbrucken, 2014. 400 s.
7. Smierzchalski, R. and Michalewicz, Z. (2000). Modeling of ship trajectory in collision situations by an evolutionary algorithm. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 4(3), 227–241.
8. Szlapczynski, R. (2011). Evolutionary sets of safe ship trajectories a new approach to collision avoidance. *The Journal of Navigation*, 64, 169–181.
9. Wilson, P., Harris, C. and Hong, X. (2003). A line-of-sight counteraction navigation algorithm for ship encounter collision avoidance. *The Journal of Navigation*, 56(1), 111–121.
10. Zeng, X. (2003). Evolution of the safe path for ship navigation. *Applied Artificial Intelligence*, 17(2), 87–104.
11. Tam, C. and Bucknall, R. (2010). Path-planning algorithm for ships in close-range encounters. *Journal of Marine Science and technology*, 15(4), 395–407.
12. Tam, C. and Bucknall, R. (2013). Cooperative path planning algorithm for marine surface vessels. *Ocean Engineering*, 57, 25–33.
13. Perera, L. P., Carvalho, J. P. and Soares, C. G. (2011). Fuzzy logic-based decision-making system for collision avoidance of ocean navigation under critical collision conditions. *Journal of Marine Science and technology*, 16(1), 84–99.
14. Perera, L. P., Carvalho, J. P. and Soares, C. G. (2012). Intelligent ocean navigation and fuzzy-Bayesian decision.action formulation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 37(2), 204–219.
15. Lee, S., Kwon, K. and Joh, J. (2004). A fuzzy logic for autonomous navigation of marine vehicles satisfying COLREG guidelines. *International Journal of Control Automation and Systems*, 2(2), 171–181.
16. Xue, Y., Clelland, D., Lee, B. and Han, D. (2011). Automatic simulation of ship navigation. *Ocean Engineering*, 38, 2290–2305.
17. Kuwata, Y., Wolf, M., Zarzhitsky, D. and Huntsberger, T. (2014). Safe maritime autonomous navigation with COLREGS, using velocity obstacles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 39(1), 110–119.
18. Lazarowska, A. (2015). Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony optimization. *The Journal of Navigation*, 68, 291–307.
19. Lazarowska, A. (2017). A new deterministic approach in a decision support system for ship's trajectory planning. *Expert Systems with Applications*, 71, 469–478.

20. Johansen, T. A., Perez, T. and Cristofaro, A. (2016). Ship collision avoidance and COLREGS compliance using simulation-based control behavior selection with predictive hazard assessment. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(12), 3407–3422.
21. Brcko, T., & Svetak, J. (2013). Fuzzy reasoning as a base for collision avoidance decision support system. *Promet–Traffic & Transportation*, 25(6), 555-564
22. Lyu, H. and Yin, Y. (2017). Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on modified artificial potential field. In 2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE), 351–357.
23. Bol'shakov A. A., Stepanov M. F., Stepanov A. M., Ul'yanina Yu. A. Planirovanie traektorii dvizheniy mobil'nogo robota. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Trajectory planning of mobile Robot]*. 2010. № 51. S. 176-180.
24. VMO-№ 471. Rukovodstvo po morskому meteorologicheskomu obsluzhivaniyu [Marine Meteorological Service regulations]. Zheneva, Shveytsariya, 2018. – 93 s.
25. Vadim V. Astrein, Viktor I. Filatov, Provisions and methods for the development of automatic monitoring of navigation safety, *Marine intellectual technologies*. 2022. № 3 part 1. P. 188—197.
26. Vadim V. Astrein, Viktor I. Filatov. Principles of automatic monitoring and control ship movements in real time, *Marine intellectual technologies*. 2023. № 1 part 1, P. 158—168

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

Вадим Викторович Астреин, доктор технических наук, 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, Dr. Sci. (Eng), Professor of the Department of Navigation, Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. E-mail: Astrein-vadim@rambler.ru.

Виктор Иванович Филатов, научный сотрудник, государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93, E-mail: Filatov_viktor1994@mail.ru.

Viktor I. Filatov, scientific researcher, 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 15.06.2023
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 03.08.2023
Принята к публикации/accepted for publication 16.08.2023

Научная статья

УДК 681.883 : 519.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.014>

Вероятностный анализ непрерывной работы пассивных обнаружителей движущихся источников шумоизлучения

С.Б. Егоров¹ Stanislav.Egorov.1938@gmail.com, Р.И. Горбачев¹ gorbatschow.r@gmail.com¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В работе получены вероятностные характеристики ожидания и обнаружения сигнала для пассивных обнаружителей движущихся источников шумоизлучения. Вывод характеристик выполнен путем использования выбросовой вероятностной модели непрерывного контроля текущих значений индикаторных процессов – помехового и суммарного (сигнально-помехового) в индикаторном устройстве обнаружителя. Рассмотрены обнаружители двух видов: однопороговый (с порогом обнаружения только по уровню) и двухпороговый (с порогами обнаружения по уровню и длительности). Характеристики однопорогового обнаружителя определены в полном диапазоне значений вероятностей ложной тревоги и правильного обнаружения. Для двухпорогового обнаружителя характеристика ожидания определена в диапазоне значений вероятности ложной тревоги менее 0.1, характеристика обнаружения – в диапазоне значений вероятности правильного обнаружения более 0.9. Эти диапазоны достаточны как для определения порогов обнаружения по уровню и длительности по заданной величине вероятности ложной тревоги, так и для определения индикаторной аппаратной чувствительности обнаружителя по заданной величине вероятности правильного обнаружения. Анализом и сравнением характеристик обнаружителей двух видов показаны дополнительные возможности, возникающие с введением порога обнаружения по длительности.

Ключевые слова: пассивный обнаружитель, однопороговый и двухпороговый обнаружители, вероятностные характеристики ожидания и обнаружения сигнала, индикаторная аппаратная чувствительность обнаружителя.

Для цитирования: Егоров С.Б., Горбачев Р.И., Вероятностный анализ непрерывной работы пассивных обнаружителей движущихся источников шумоизлучения, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 145—154. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.014

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.014>

Probabilistic analysis of continuous operation of passive detectors of moving noise sources

Stanislav B. Egorov¹ Stanislav.Egorov.1938@gmail.com, Roman I. Gorbachev¹ gorbatschow.r@gmail.com¹State marine technical university of Saint-Petersburg, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The study presents probabilistic characteristics of signal waiting and detection for passive detectors of moving noise sources. These characteristics were obtained by employing an outlier-based probabilistic model of continuous monitoring of current values of indicator processes - noise and cumulative (signal-to-noise) in the indicator device of the detector. Detectors of two types were considered: single-threshold (with detection threshold based solely on level) and dual-threshold (with detection thresholds based on level and duration). The characteristics of the single-threshold detector are defined across the full range of false alarm probabilities and correct detection probabilities. For the dual-threshold detector, the waiting characteristic is defined within the range of values of false alarm less than 0.1 and detection characteristic - within the range of values of correct detection probability more than 0.9. These ranges are sufficient for both determining detection thresholds based on both level and duration for a given false alarm probability, as well as for determining the indicator hardware sensitivity of the detector for a given correct detection probability. Through analysis and comparison of the characteristics of the two types of detectors, additional capabilities arising from the introduction of a duration-based detection threshold are demonstrated.

Keywords: passive detector, single-threshold and dual-threshold detectors, probabilistic characteristics of signal waiting and detection, indicator system sensitivity of the detector

For citation: Stanislav B. Egorov, Roman I. Gorbachev, Probabilistic analysis of continuous operation of passive detectors of moving noise sources, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 1, P. 145—154. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.014

Введение

Рассматривается пассивный обнаружитель шумового сигнала движущегося источника шумоизлучения, работающий непрерывно во времени с момента включения до момента обнаружения сигнала [1]. Обнаружитель содержит приемный тракт (ПТ) с направленной антенной, формирователь оптимальной «решающей

статистики» в режиме «скользящего окна» – формирователь индикаторного процесса (ФИП), а также индикаторное устройство (ИУ) в виде последовательного соединения двух пороговых устройств компараторного типа: селектора сигнала по уровню с порогом чувствительности u_0 и селектора сигнала по длительности с порогом

чувствительности τ_0 . Укрупненная структура обнаружителя приведена на рис 1.

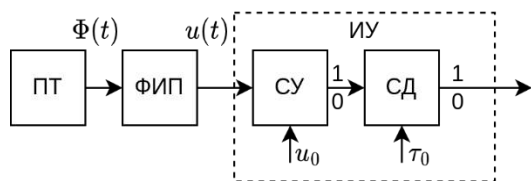


Рис. 1 – Укрупненная структура обнаружителя: ПТ – приемный тракт; ФИП – формирователь индикаторного процесса; ИУ – индикаторное устройство.

Для оценки полевой чувствительности обнаружителя – минимальной приведенной шумности источника шумоизлучения, при которой достигается заданная вероятность правильного обнаружения его сигнала, необходимы две вероятностные характеристики обнаружителя: характеристика ожидания сигнала и характеристика обнаружения сигнала.

Вероятностная характеристика ожидания сигнала – это зависимость вероятности ложной тревоги $P_{ЛТ}$ на интервале ожидания T_0 от длительности этого интервала, от порогов обнаружения по уровню и длительности u_0 и τ_0 , а также от характеристик и числовых параметров помехового индикаторного процесса $u_n(t)$. Характеристика ожидания необходима для определения порогов u_0 и τ_0 по заданной вероятности ложной тревоги.

Вероятностная характеристика обнаружения – это зависимость вероятности правильного обнаружения $P_{ПО}$ на интервале обнаружения T_M от отношения сигнал/помеха, от длительности интервала обнаружения, от порогов обнаружения u_0 и τ_0 , а также от характеристик и числовых параметров суммарного (сигнально-помехового) индикаторного процесса $u_{\Sigma}(t)$. Характеристика обнаружения необходима для определения порогового отношения сигнал/помеха (ОСП), при котором достигается заданная вероятность правильного обнаружения. Этой пороговой величиной ОСП оценивается аппаратная (аппаратурная, внутрисхемная) чувствительность обнаружителя [2].

Аппаратная чувствительность обнаружителя определяется в двух точках его функциональной структуры (рис. 1): на выходе ФИП и на выходе ПТ. На выходе ФИП аппаратная чувствительность называется «индикаторной», на выходе ПТ – «приемной». Они связаны между собой [1] и с полевой чувствительностью, но первой из них определяется индикаторная – пороговое индикаторное отношение сигнал/помеха (ИОСП).

Для определения индикаторной чувствительности вероятностная характеристика обнаружения должна представлять собой функцию $P_{ПО}$ от ИОСП. Именно такие характеристики рассматриваются в данной работе.

Целью работы является получение аналитических выражений для вероятностных характеристик ожидания и обнаружения рассматриваемого обнаружителя. Цель достигается вероятностным анализом его непрерывной работы на конечном отрезке времени. Вероятностный анализ строится на основе «выбросовой» трактовки непрерывного контроля текущих значений индикаторного процесса на конечном отрезке времени. Такая трактовка основана на том, что состояния селекторов сигнала по уровню и длительности в индикаторном устройстве обнаружителя определяют появляющиеся на интервале наблюдения положительные выбросы индикаторного процесса относительно уровня обнаружения u_0 .

Выбросовая вероятностная модель воздействия индикаторного процесса на индикаторное устройство обнаружителя требует привлечение к анализу не только характеристик самого процесса на конечном отрезке времени, но и характеристик его выбросов.

В теории случайных процессов относительно полно изучены указанные характеристики только для нормального стационарного процесса. По этой причине метод анализа применим к пассивным обнаружителям, в которых выполняется условие нормализации как помехового, так и суммарного индикаторных процессов.

Выбросовая модель применима для анализа непрерывной работы обнаружителей разного вида и состава. Для демонстрации универсальности методики в статье приведены выводы вероятностных характеристик ожидания и обнаружения двух обнаружителей: однопорогового (с порогом только по уровню) и двух порогового (с п порогом по уровню и длительности).

Анализ работы обнаружителя с порогом обнаружения только по уровню в режиме ожидания сигнала

Полагаем, что в индикаторном устройстве содержится только селектор сигнала по уровню с порогом чувствительности (порогом обнаружения) u_0 . В таком обнаружителе появлению ложной тревоги на интервале ожидания T_0 эквивалентно появление на этом интервале хотя бы одного положительного выброса помехового индикаторного процесса $u_n(t)$ относительно уровня u_0 – «ложного выброса».

Альтернативе, – неоявлению ложной тревоги на интервале T_0 , эквивалентно неоявление ни одного ложного выброса на этом интервале. Введем понятие «опыт по наблюдению за появлением ложных выбросов на интервале ожидания T_0 » и выполним серию таких опытов.

Каждый опыт завершается появлением целого числа ложных выбросов, при условии, что в начале T_0 процесс всегда находится ниже уровня u_0 , а на T_0 появляется целое число начал выбросов – касаний или пересечений уровня u_0 снизу вверх. При этом, последний выброс может не закончиться в

пределах T_0 , но зачитывается как цельный, т.к. вызывает ложную тревогу.

В серии опытов, выполненных в одинаковых условиях, число выбросов n меняется от опыта к опыту случайным образом, принимая значения от $n=0$ до $n=n_{\max}$. Величина n_{\max} определяется параметрами процесса $u_n(t)$, порогом u_0 и длительностью интервала T_0 .

Введем вероятности появления в опыте каждого числа n ложных выбросов: $P(0), P(1), \dots, P(n_{\max})$.

Появления в опытах разных чисел n – несовместимые события, составляющие полную группу, поэтому сумма их вероятностей равна единице

$$P(0) + \sum_{n=1}^{n_{\max}} P(n) = 1. \quad (1)$$

На основании отмеченных ранее эквивалентностей случайных событий получаем соотношение для вероятности ложной тревоги $P_{\Delta T}$ на интервале ожидания T_0

$$P_{\Delta T} = \sum_{n=1}^{n_{\max}} P(n) = 1 - P(0). \quad (2)$$

Непоявление ни одного положительного выброса процесса $u_n(t)$ относительно уровня u_0 на T_0 – это недостижение текущими значениями процесса уровня u_0 на этом интервале, если в начале T_0 процесс был ниже u_0 . Вероятность такого события определяется значением функции распределения вероятностей (ФРВ) процесса на интервале времени T_0 . Для стационарного процесса эта ФРВ – функция уровня u_0 и длительности интервала T_0 , – функция $F(u_0, T_0)$. Следовательно, в нашем случае

$$P(0) = F(u_0, T_0), \quad (3)$$

$$P_{\Delta T} = 1 - F(u_0, T_0). \quad (4)$$

Аналитическое выражение для ФРВ $F(u, T)$ нормального стационарного процесса приведено (с выводом) в [3]. Используя в этом выражении величины $u = u_0$, $T = T_0$ и числовые параметры помехового индикаторного процесса: математическое ожидание (МО), μ_n , среднее квадратичное отклонение (СКО) σ_n и среднюю квадратичную частоту (СКЧ) f_n , запишем выражение в виде:

$$P(0) = F(u_0, T_0) = \Phi(k_n) \exp\left(-\frac{f_n T_0}{\Phi(k_n)} \exp\left(-\frac{k_n^2}{2}\right)\right), \quad (5)$$

где

$$k_n = \frac{u_0 - \mu_n}{\sigma_n} \quad (6)$$

– относительный порог обнаружения;

$$\Phi(k_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{k_n} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (7)$$

– интеграл вероятности Лапласа.

СКЧ f_n процесса $u_n(t)$ связана с его нормированной автокорреляцией $R_n(\tau)$ соотношением

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-R_n''(0)}. \quad (8)$$

Следовательно, если порог обнаружения по уровню в индикаторном устройстве обнаружителя формируется по алгоритму

$$u_0 = \mu_n + k_n \sigma_n, \quad (9)$$

согласно (6), то вероятностная характеристика ожидания сигнала в однопороговом обнаружителе определяется выражением:

$$P_{\Delta T} = 1 - \Phi(k_n) \exp\left(-\frac{f_n T_0}{\Phi(k_n)} \exp\left(-\frac{k_n^2}{2}\right)\right). \quad (10)$$

При заданных величинах T_0 и $P_{\Delta T}$, а также трех указанных параметров помехового индикаторного процесса равенство (10) является трансцендентным уравнением относительно порога k_n , обеспечивающего заданное $P_{\Delta T}$.

При величинах $P_{\Delta T} \leq 10^{-1}$ значения $k_n \geq 2.5$ и допустимо приближение в (10):

$$P_{\Delta T} = 1 - \exp\left(-f_n T_0 \exp\left(-\frac{k_n^2}{2}\right)\right),$$

которое на основании другого приближения

$$\ln\left(\frac{1}{1 - P_{\Delta T}}\right) \approx P_{\Delta T}$$

упрощается до соотношения

$$P_{\Delta T} \approx f_n T_0 \exp\left(-\frac{k_n^2}{2}\right). \quad (11)$$

Последнее легко решается относительно k_n :

$$k_n = \sqrt{2 \ln \frac{f_n T_0}{P_{\Delta T}}}. \quad (12)$$

Кроме того, соотношение (11) дает простую трактовку вероятности ложной тревоги на интервале ожидания T_0 : эта вероятность равна среднему числу ложных выбросов на интервале ожидания T_0 .

Действительно, среди числовых параметров выбросов нормального стационарного процессе известен средний период их появления во времени T_c [3] [4]

$$T_c = \frac{1}{f_n} \exp\left(\frac{k_n^2}{2}\right). \quad (13)$$

Тогда отношение $\frac{T_0}{T_c}$ – это среднее число ложных выбросов n_c на интервале T_0

$$n_c = \frac{T_0}{T_c} = f_n T_0 \exp\left(-\frac{k_n^2}{2}\right), \quad (14)$$

что совпадает с (11).

Характеристика ожидания (10) применима при изменении T_0 в диапазоне $T_0 \geq 0$ и при $k_n \geq 0$.

Анализ работы обнаружителя с порогами обнаружения по уровню и длительности в режиме ожидания сигнала

Появлению ложной тревоги на интервале ожидания T_0 в таком обнаружителе эквивалентно появлению на интервале T_0 хотя бы одного положительного выброса процесса $u_n(t)$ относительно уровня u_0 с длительностью $\tau \geq \tau_0$ – ложного выброса длительностью $\tau \geq \tau_0$.

Непоявлению на интервале T_0 ложной тревоги эквивалентно появление любого из следующих несовместных событий:

– на T_0 не появилось ни одного ложного выброса любой длительности;

– на T_0 появилось любое число n ложных выбросов и все выбросы оказывались с длительностью $\tau < \tau_0$.

Учитывая, что число n колеблется от $n=1$ до $n=n_{\max}$, получаем общее число событий второго типа равным n_{\max} .

Определим и обозначим вероятности перечисленных событий. Вероятность непоявления ни одного ложного выброса на интервале T_0 тем же символом $P(0)$. Появлению на T_0 одного ложного выброса длительностью $\tau < \tau_0$ эквивалентно появлению совместно двух событий:

– на T_0 появился один выброс (событие $n=1$);

– длительность этого выброса оказалась меньше τ_0 (событие $\tau < \tau_0$). Тогда

$$P(1, \tau < \tau_0) = P(1)P(\tau < \tau_0 / 1),$$

где $P(\tau < \tau_0 / 1)$ – условная вероятность того, что длительность выброса меньше τ_0 , если на T_0 появился только один выброс.

В общем случае, когда на T_0 появилось n выбросов и все n имеют длительность $\tau < \tau_0$ – это совместное появление $n+1$ события: появилось n выбросов, первый выброс имеет длительность $\tau_1 < \tau_0$, второй – длительность $\tau_2 < \tau_0$, ... n -ый имеет длительность $\tau_n < \tau_0$. Обозначим вероятность такого совместного события:

$$P(n, \tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0, \dots, \tau_n < \tau_0) = P(n)P(\tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0, \dots, \tau_n < \tau_0 / n). \quad (15)$$

Вероятность появления любого из несовместных событий равна сумме вероятностей появления каждого из них. Отсюда следует соотношение для $P_{\Lambda T}$ в рассматриваемом случае:

$$P_{\Lambda T} = 1 - P(0) - \sum_{n=1}^{n_{\max}} P(n)P(\tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0, \dots, \tau_n < \tau_0 / n). \quad (16)$$

Вероятностные характеристики длительности выбросов, появляющихся на ограниченном интервале времени T_0 , зависит от их числа на этом интервале только в том случае, когда длительность интервала соизмерима или меньше средней длительности выброса τ_c . Если $T_0 \ll \tau_c$, эта зависимость отсутствует (ею можно пренебречь).

Будем рассматривать случай, когда условие $T_0 \ll \tau_c$ выполняется. Тогда условная вероятность $P(\tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0, \dots, \tau_n < \tau_0 / n)$ становится безусловной и соотношение (16) принимает вид:

$$P_{\Lambda T} = 1 - P(0) - \sum_{n=1}^{n_{\max}} P(n)P(\tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0, \dots, \tau_n < \tau_0). \quad (17)$$

По теореме умножения вероятностей для n зависимых событий имеет место соотношение [3]

$$P(\tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0, \dots, \tau_n < \tau_0) = P(\tau_1 < \tau_0) \times \frac{P(\tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0)}{P(\tau_1 < \tau_0)} \times \frac{P(\tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0, \tau_3 < \tau_0)}{P(\tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0)} \times \frac{P(\tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0, \dots, \tau_n < \tau_0)}{P(\tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0, \dots, \tau_{n-1} < \tau_0)}. \quad (18)$$

Учитывая ослабление взаимосвязи между выбросами в последовательности с ростом разности их номеров, полагаем что существенной является взаимосвязь между парой смежных выбросов. Тогда допустимы приближения в (18) [3]:

$$\frac{P(\tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0, \tau_3 < \tau_0)}{P(\tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0)} = \frac{P(\tau_2 < \tau_0, \tau_3 < \tau_0)}{P(\tau_2 < \tau_0)}; \frac{P(\tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0, \dots, \tau_n < \tau_0)}{P(\tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0, \dots, \tau_{n-1} < \tau_0)} = \frac{P(\tau_{n-1} < \tau_0, \tau_n < \tau_0)}{P(\tau_{n-1} < \tau_0)};$$

а с учетом стационарности процесса $u_n(t)$, когда взаимосвязь между парой смежных выбросов не зависит от их положения внутри T_0 , вместо (18) получаем соотношение:

$$P(\tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0, \dots, \tau_n < \tau_0) = P(\tau_1 < \tau_0) \left(\frac{P(\tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0)}{P(\tau_1 < \tau_0)} \right)^{n-1}. \quad (19)$$

С учетом этого приближения, выражение для $P_{\Lambda T}(T_0)$ (17) принимает вид:

$$P_{\Lambda T} = 1 - P(0) - \sum_{n=1}^{n_{\max}} P(n)P(\tau_1 < \tau_0) \left(\frac{P(\tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0)}{P(\tau_1 < \tau_0)} \right)^{n-1}. \quad (20)$$

К сожалению, в теории выбросов случайных процессов вероятности $P(n)$ и отношение вероятностей

$$\frac{P(\tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0)}{P(\tau_1 < \tau_0)}$$

не определены, т.е. не выражены через параметры процесса и его выбросов. По этой причине приходится пренебречь взаимосвязью между длительностями соседних положительных выбросов на T_0 , полагая события $\tau_1 < \tau_0, \tau_2 < \tau_0, \dots, \tau_n < \tau_0$ независимыми, а вероятности $P(\tau_1 < \tau_0)$ и $P(\tau_2 < \tau_0)$ – одинаковыми для всех выбросов

$$P(\tau_1 < \tau_0) = P(\tau_2 < \tau_0) = P(\tau < \tau_0). \quad (21)$$

В таком приближении выражение (20) принимает вид:

$$P_{\Delta T} = 1 - P(0) - \sum_{n=1}^{n_{\max}} P(n) P^n(\tau < \tau_0). \quad (22)$$

Проанализируем это выражение, ориентируясь на нижний участок вероятностной характеристики ожидания сигнала, где значений $P_{\Delta T}$ малы – не превышают 10^{-1} , что представляет интерес для практики.

Кроме того, для практики и анализа интересны варианты малых значений относительного порога k_n , вплоть до $k_n = 0$ или $u_0 = \mu_n$, когда вероятность $P(0)$ и вероятности малых значений n $P(1), P(2), \dots$ много меньше единицы.

В этих условиях значения $P_{\Delta T} \leq 10^{-1}$ могут быть достигнуты только при $P(\tau < \tau_0)$ близких к единице. Это видно из структуры выражения (22).

Для помехового индикаторного процесса $u_n(t)$ с параметрами μ_n, σ_n, f_n ФРВ длительности положительных выбросов относительно уровня u_0 , – функция $F_+(\tau, u_0)$ определяется выражением [3]:

$$\begin{aligned} F_+(\tau, u_0) &= \\ &= 1 - \exp\left(-\frac{f_n \tau}{1 - \Phi(k_n)} \exp\left(-\frac{k_n^2}{2}\right)\right) = \\ &= 1 - \exp(-\alpha \tau). \end{aligned} \quad (23)$$

Имея ФРВ случайной величины τ (23), определяем функцию плотности вероятности τ

$$\frac{\partial F(\tau, u_0)}{\partial \tau} = W_+(\tau, u_0) = \alpha \exp(-\alpha \tau)$$

и среднюю длительность ложного выброса

$$\tau_c = \alpha \int_0^{\infty} \tau \exp(\alpha \tau) d\tau = \frac{1}{\alpha}. \quad (24)$$

Из (23) и (24) следует интересное нас отношение

$$\frac{T_0}{\tau_c} = \frac{f_n T_0}{1 - \Phi(k_n)} \exp\left(-\frac{k_n^2}{2}\right). \quad (25)$$

Это отношение минимально при $k_n = 0$. Следовательно, чтобы даже в худшем случае длительность интервала ожидания T_0 на порядок превышала среднюю длительность выброса (для независимости длительностей выбросов от их числа на интервале T_0), достаточно выполнить условие

$$\frac{T_0}{\tau_c} \min = 2 f_n T_0 \geq 10. \quad (26)$$

Вернемся к анализу выражения (22). Из (23) следует, что $P(\tau < \tau_0)$ близко к единице, когда $\exp(-\alpha \tau_0) \rightarrow 0$. В этом случае допустимо приближение

$$(1 - \exp(-\alpha \tau_0))^n \approx 1 - n \exp(-\alpha \tau_0), \quad (27)$$

используя которое в (22), получаем:

$$\begin{aligned} P_{\Delta T} &= 1 - P(0) - \\ &- \sum_{n=1}^{n_{\max}} P(n) + \exp(-\alpha \tau_0) \sum_{n=1}^{n_{\max}} n P(n). \end{aligned} \quad (28)$$

Но

$$\sum_{n=1}^{n_{\max}} P(n) = 1 - P(0), \quad (29)$$

а сумма

$$\sum_{n=1}^{n_{\max}} n P(n) = n_c \quad (30)$$

– это среднее число ложных выбросов любой длительности на интервале T_0 .

По определению n_c равно отношению

$$n_c = \frac{T_0}{\tau_c} \quad (31)$$

и определяется аналогично (25).

С учетом (29), (30) и (31) выражение (28) для $P_{\Delta T}(T_0)$ принимает окончательный вид:

$$\begin{aligned} P_{\Delta T} &= n_c \exp(-\alpha \tau_0) = \\ &= f_n T_0 \exp\left(-\frac{k_n^2}{2} - \frac{f_n \tau_0}{1 - \Phi(k_n)} \exp\left(-\frac{k_n^2}{2}\right)\right). \end{aligned} \quad (32)$$

Это выражение описывает нижний участок вероятностной характеристики ожидания сигнала для значений $P_{\Delta T} \leq 10^{-1}$.

По аналогии с относительным порогом обнаружения по уровню введем относительный порог обнаружения по длительности

$$x = f_n \tau_0 \quad (33)$$

для удобства анализа.

Тогда возможное сочетание порогов по уровню и длительности для обеспечения заданной вероятности $P_{\Delta T}$ на заданном интервале ожидания T_0 определяется из уравнения

$$\begin{aligned} P_{\Delta T} &= f_n T_0 \times \\ &\times \exp\left(-\frac{k_n^2}{2} - \frac{x}{1 - \Phi(k_n)} \exp\left(-\frac{k_n^2}{2}\right)\right). \end{aligned} \quad (34)$$

Это уравнение допускает изменение обоих порогов, и k_n , и x , от нуля до необходимых значений.

Рассмотрим два предельных варианта сочетаний порогов.

При $x = 0$ (порог по длительности отсутствует, $\tau_0 = 0$) выражение (34) принимает вид, полученный анализом обнаружителя с одним порогом по уровню для значений $P_{\text{ЛТ}} \leq 10^{-1}$

$$P_{\text{ЛТ}} = f_n T_0 \exp\left(-\frac{k_n^2}{2}\right) \quad (35)$$

и порогом k_n , обеспечивающим заданную величину $P_{\text{ЛТ}}$

$$k_n = \sqrt{2 \ln \frac{f_n T_0}{P_{\text{ЛТ}}}}. \quad (36)$$

При $k_n = 0$ ($u_0 = \mu_n$) выражение (34) имеет вид:

$$P_{\text{ЛТ}} = f_n T_0 \exp(-2x). \quad (37)$$

Из этого выражения определяется величина порога обнаружения по длительности x , обеспечивающая заданную величину $P_{\text{ЛТ}}$

$$x = 0.5 \ln\left(\frac{f_n T_0}{P_{\text{ЛТ}}}\right). \quad (38)$$

Анализом однопорогового обнаружителя было установлено, что при $P_{\text{ЛТ}} \leq 10^{-1}$ величина $P_{\text{ЛТ}}$ равна среднему числу ложных выбросов на интервале ожидания сигнала.

Трактуя (34) подобным образом, приходим к выводу, что средний период появления на T_0 ложных выбросов длительностью $\tau \geq \tau_0$ – величина $T_c(\tau_0)$, определяется выражением

$$\begin{aligned} T_c(\tau_0) &= \frac{T_0}{n_c(\tau_0)} = \frac{T_0}{P_{\text{ЛТ}}(T_0)} = \\ &= \frac{1}{f_n} \exp\left(\frac{k^2}{2}\right) \exp\left(\frac{x}{1 - \Phi(k_n)} \exp\left(-\frac{k_n^2}{2}\right)\right) = \\ &= \frac{T_c}{P(\tau \geq \tau_0)}, \end{aligned} \quad (39)$$

где

$$T_c = \frac{1}{f_n} \exp\left(\frac{k_n^2}{2}\right)$$

средний период появления ложных выбросов любой длительности на T_0 согласно (13), а вероятность

$P(\tau \geq \tau_0)$ определяется из (23):

$$\begin{aligned} P(\tau \geq \tau_0) &= 1 - P(\tau < \tau_0) = \\ &= \exp\left(-\frac{x}{1 - \Phi(k_n)} \exp\left(-\frac{k_n^2}{2}\right)\right). \end{aligned} \quad (40)$$

Анализ работы обнаружителя с порогом обнаружения только по уровню в режиме обнаружения сигнала

Работа пассивного обнаружителя в режиме обнаружения начинается с момента вхождения движущегося источника шумозлучения (источника сигнала) в локальную зону чувствительности приемного тракта с направленной антенной.

Будем оценивать вероятность правильного обнаружения сигнала движущегося источника на конечном отрезке времени – интервале обнаружения T_M . Длительность интервала T_M принимаем равной длительности максимума нормированной проходной характеристики источника на выходе формирователя индикаторного процесса. Длительность максимума определяется на уровне 0.95, что позволяет воспользоваться локально стационарным приближением. В этом приближении числовые параметры суммарного индикаторного процесса $u_\Sigma(t)$, определяемые в момент $t = t_M$ выхода источника сигнала на максимум пространственной характеристики направленности приемной антенны, считается постоянным на интервале T_M . Этими параметрами являются: МО $\mu_\Sigma(t_M)$, СКО $\sigma_\Sigma(t_M) = \sigma_\Sigma$ и СКЧ $f_\Sigma(t_M) = f_\Sigma$. Полагаем что текущее значение процесса $u_\Sigma(t)$ находится ниже уровня обнаружения u_0 в начале интервала T_M . Тогда появление на T_M хотя бы одного положительного выброса процесса, «правильного выброса», эквивалентно принятию решения «сигнал обнаружен».

Непоявление на интервале T_M ни одного выброса эквивалентно пропуску сигнала. Обозначив символом $P(0)$ вероятность пропуска сигнала, а символом $P_{\text{ПО}}$ вероятность правильного обнаружения, имеем соотношение

$$P_{\text{ПО}} = 1 - P(0). \quad (41)$$

Величина $P(0)$ равна значению ФРВ процесса $u_\Sigma(t)$ на конечном интервале времени T_M и определяется выражением, аналогичным (5):

$$\begin{aligned} P(0) &= F(u_0, T_M) = \\ &= \Phi(k_\Sigma) \exp\left(-\frac{f_\Sigma T_M}{\Phi(k_\Sigma)} \exp\left(-\frac{k_\Sigma^2}{2}\right)\right), \end{aligned} \quad (42)$$

где

$$k_\Sigma = \frac{u_0 - \mu_\Sigma}{\sigma_\Sigma} \quad (43)$$

– относительный уровень обнаружения для процесса $u_\Sigma(t)$.

Вероятность правильного обнаружения сигнала на интервале T_M определяется согласно (41):

$$P_{\text{ПО}} = 1 - \Phi(k_\Sigma) \exp\left(-\frac{f_\Sigma T_M}{\Phi(k_\Sigma)} \exp\left(-\frac{k_\Sigma^2}{2}\right)\right) \quad (44)$$

Преобразуем выражение (43) для аргумента интеграла вероятности, чтобы выделить в нем в явном виде индикаторное отношение сигнал/помеха.

Порог u_0 в (43) известен:

$$u_0 = \mu_n + k_n \sigma_n. \quad (45)$$

МО μ_Σ образовано добавкой к МО помехи μ_n сигнальной составляющей $\mu_s(t_M) = \mu_s$

$$\mu_\Sigma = \mu_n + \mu_s. \quad (46)$$

Подстановкой (45) и (46) в (43) получаем соотношение

$$k_{\Sigma} = \left(k_n - \frac{\mu_s}{\sigma_n} \right) \frac{\sigma_n}{\sigma_{\Sigma}}, \quad (47)$$

где

$$\gamma = \frac{\mu_s}{\sigma_n} \quad (48)$$

имеет название «индикаторное отношение сигнал/помеха» (ИОСП). Именно через это отношение сигнал влияет на величину $P_{\text{ПО}}$.

Как функция γ $P_{\text{ПО}}$ состоит из двух участков, нижнего и верхнего, а точкой их раздела является $k_{\Sigma} = 0$, т.е. $\gamma = k_n$.

Согласно (44) в точке $k_{\Sigma} = 0$ $P_{\text{ПО}}(T_M)$ имеет величину

$$P_{\text{ПО}} = 1 - 0.5 \exp(-2f_{\Sigma}T_M) > 0.5.$$

Требуемое значение $P_{\text{ПО}}$ находится в диапазоне $0.9 \leq P_{\text{ПО}} < 1$, т.е. на верхнем участке вероятностной характеристики обнаружения, где $\gamma > k_n$ или $k_{\Sigma} < 0$. Чтобы иметь уравнение для определения пороговой величины ИОСП γ_0 , при котором достигается требуемое значение $P_{\text{ПО}}$, запишем соотношение (44) при $\gamma > k_n$. Для этого введем относительный уровень

$$k_s = -k_{\Sigma} = (\gamma - k_n) \frac{\sigma_n}{\sigma_{\Sigma}} \quad (49)$$

и воспользуемся свойством интеграла вероятности Лапласа

$$\Phi(-k_s) = 1 - \Phi(k_s). \quad (50)$$

Выражение (44) примет вид:

$$P_{\text{ПО}} = 1 - (1 - \Phi(k_s)) \times \exp\left(-\frac{f_{\Sigma}T_M}{1 - \Phi(k_s)} \exp\left(-\frac{k_s^2}{2}\right)\right). \quad (51)$$

Это выражение описывает верхний участок вероятностной характеристики обнаружения как зависимость $P_{\text{ПО}}$ от ИОСП γ , от длительности интервала обнаружения T_M и параметров суммарного индикаторного процесса $u_{\Sigma}(t)$.

При $T_M = 0$, т.е. без учета конечного времени работы в режиме обнаружения из (51) получаем известное соотношение – вероятность $P_{\text{ПО}}$ «в точке»

$$P_{\text{ПО}} = \Phi(k_s). \quad (52)$$

Конечное время работы в режиме обнаружения повышает вероятность правильного обнаружения по сравнению с (52).

Подставляя в (51) заданную величину $P_{\text{ПО}}$ и полученное заранее относительное время обнаружения $f_{\Sigma}T_M$, решаем (51) относительно неизвестного k_s и приходим к пороговой величине ИОСП γ_0 :

$$\gamma_0 = k_s \frac{\sigma_{\Sigma}}{\sigma_n} + k_n. \quad (53)$$

Величина γ_0 – и есть оценка «индикаторной» аппаратной чувствительности обнаружителя к появлению сигнала на фоне помехи.

Анализ работы обнаружителя с порогом по уровню и длительности в режиме обнаружения сигнала

Анализ работы обнаружителя с двумя порогом в режиме обнаружения выполним также на конечном отрезке времени – на интервале обнаружения T_M .

Итак, процесс $u_{\Sigma}(t)$ нормальный, стационарный на интервале T_M и имеет числовые параметры μ_{Σ} , σ_{Σ} и f_{Σ} . Его мгновенное значение находится ниже уровня обнаружения u_0 в начале интервала T_M .

Анализ выполним для верхнего участка вероятностной характеристики обнаружения, в области значений вероятности правильного обнаружения $P_{\text{ПО}} \geq 0.9$. В этом случае МО $\mu_{\Sigma} > u_0$, ИОСП $\gamma > k_n$ и средняя длительность положительных выбросов процесса $u_{\Sigma}(t)$ относительно уровня u_0 определяется выражением (Денисекно, 2005):

$$\tau_c = \frac{\Phi(k_s)}{f_{\Sigma}} \exp\left(\frac{k_s^2}{2}\right), \quad (54)$$

где

$$k_s = (\gamma - k_n) \frac{\sigma_n}{\sigma_{\Sigma}}. \quad (55)$$

Длительность интервала T_M зависит от ряда факторов, в том числе от неизвестных заранее, поэтому рассмотрим худший вариант, когда T_M незначительно превышает τ_0 , т.е. интервал $T_M - \tau_0$ мал.

В рассматриваемом обнаружителе принятию правильного решения «сигнал обнаружен» эквивалентно совместное появление двух случайных событий:

- на интервале времени $T_M - \tau_0$ появилось хотя бы одно начало положительного выброса процесса $u_{\Sigma}(t)$ относительно уровня u_0 – начала «правильного» выброса;

- хотя бы один из появившихся выбросов достиг или превысил по длительности порог τ_0 .

Однако, эта общая формулировка эквивалентного совместного события существенно изменяется, когда $\gamma > k_n$ и $P_{\text{ПО}} \geq 0.9$, а средняя длительность правильного выброса значительно превышает длительность интервала $T_M - \tau_0$, т.е.

$$\frac{T_M - \tau_0}{\tau_c} = \frac{f_{\Sigma}(T_M - \tau_0)}{\Phi(k_s)} \exp\left(-\frac{k_s^2}{2}\right) \ll 1. \quad (56)$$

Тогда вероятности появления $P(2), P(3), \dots$ двух и более начал выбросов на $T_M - \tau_0$ настолько малы по сравнению с вероятностью непоявления ни одного

выброса $P(0)$ и вероятностью появления одного выброса $P(1)$, что их вкладом в сумму $\sum_{n=0}^{n_{\max}} P(n)$ можно пренебречь используя приближение

$$\sum_{n=0}^{n_{\max}} P(n) = 1 \approx P(0) + P(1). \quad (57)$$

Длительность одиночного выброса либо не достигает τ_0 , либо достигает и превышает τ_0 , откуда следует равенство [5]

$$P(1) = P(1, \tau_1 < \tau_0) + P(1, \tau_1 \geq \tau_0) = P(1)P(\tau_1 < \tau_0 / 1) + P(1)P(\tau_1 \geq \tau_0 / 1). \quad (58)$$

При $n=1$ условные вероятности длительности выброса становятся безусловными

$$P(\tau_1 < \tau_0 / 1) = P(\tau_1 < \tau_0), \quad (59)$$

$$P(\tau_1 \geq \tau_0 / 1) = P(\tau_1 \geq \tau_0).$$

Тогда вероятность правильного обнаружения $P_{\text{ПО}}$ равна вероятности появления на T_M одного выброса длительностью $\tau \geq \tau_0$. Из (57), (58) и (59) получаем соотношение для $P_{\text{ПО}}$ при указанных ранее условиях и приближениях:

$$P_{\text{ПО}} = (1 - P(0))P(\tau \geq \tau_0). \quad (60)$$

Для процесса $u_{\Sigma}(t)$ с указанными свойствами и параметрами при $\gamma > k_n$ аналогично (51) имеем

$$1 - P(0) = 1 - (1 - \Phi(k_s)) \times \exp\left(-\frac{f_{\Sigma}(T_M - \tau_0)}{1 - \Phi(k_s)} \exp\left(-\frac{k_s^2}{2}\right)\right), \quad (61)$$

а из (23) получаем

$$P(\tau \geq \tau_0) = \exp\left(-\frac{f_{\Sigma}\tau_0}{\Phi(k_s)} \exp\left(-\frac{k_s^2}{2}\right)\right). \quad (62)$$

При отношениях сигнал/помеха по мощности $q^2 \leq 1.0$ на выходе приемного тракта используем приближение [1]

$$f_{\Sigma} \approx f_n \quad (63)$$

и запишем в развернутом виде выражение (60) для вероятностной характеристики обнаружения на ее верхнем участке в диапазоне значений $P_{\text{ПО}} \geq 0.9$:

$$P_{\text{ПО}} = (1 - (1 - \Phi(k_s))) \times \exp\left(-\frac{f_n T_M - x}{1 - \Phi(k_s)} \exp\left(-\frac{k_s^2}{2}\right)\right) \times \exp\left(-\frac{x}{\Phi(k_s)} \exp\left(-\frac{k_s^2}{2}\right)\right), \quad (64)$$

где

$$k_s = (\gamma - k_n) \frac{\sigma_n}{\sigma_{\Sigma}}. \quad (65)$$

Из (64) видна роль непрерывной работы в режиме обнаружения. При минимальном T_M , когда $T_M = \tau_0$ и $f_n T_M = x$, имеем:

$$P_{\text{ПО}} = \Phi(k_s) \exp\left(-\frac{x}{\Phi(k_s)} \exp\left(-\frac{k_s^2}{2}\right)\right),$$

т.е. вероятность обнаружения снижается по сравнению с вероятностью «в точке»

$$P_{\text{ПО}} = \Phi(k_s).$$

Причиной снижения является дополнительный порог обнаружения – порог по длительности. Однако уже при $f_n T_M = 2x$ снижение $P_{\text{ПО}}$ компенсируется – левый множитель в (64) стремится к единице и $P_{\text{ПО}}(T_M)$ определяется выражением

$$P_{\text{ПО}} = \exp\left(-x \exp\left(-\frac{k_s^2}{2}\right)\right). \quad (66)$$

Оно легко решается относительно k_s

$$k_s = \sqrt{2 \ln \frac{x}{\ln(P_{\text{ПО}}^{-1})}} \quad (67)$$

и индикаторная чувствительность γ_0 определяется из (65)

$$\gamma_0 = k_s \frac{\sigma_{\Sigma}}{\sigma_n} + k_n \quad (68)$$

также, как в однопороговом обнаружителе – аналогично (53).

Однако, благодаря порогу по длительности величина k_n в (68) может быть снижена до нулевого значения ($k_n = 0$). При этом порог по длительности определяется из (38) и пороговое ИОСП γ_0 равно:

$$\gamma_0 = \frac{\sigma_{\Sigma}}{\sigma_n} \sqrt{2 \ln \frac{0.5 \ln(f_n T_0 P_{\text{ЛТ}}^{-1})}{\ln(P_{\text{ПО}}^{-1})}}. \quad (69)$$

Здесь T_0 , $P_{\text{ЛТ}}$ и $P_{\text{ПО}}$ известны из технического задания, а σ_n , f_n и σ_{Σ} определяются анализом преобразований сигнала и помехи в функциональной структуре обнаружителя [1].

Заключение

Выбросовый вероятностный анализ процедуры контроля текущих значений индикаторных процессов позволяет получить аналитические выражения вероятностных характеристик ожидания и обнаружения сигнала в однопороговом и двухпороговом обнаружителях.

Выражения для характеристик в однопороговом обнаружителе применимы без каких либо ограничений величин $P_{\text{ЛТ}}$ и $P_{\text{ПО}}$, длительностей интервалов ожидания T_0 и обнаружения T_M , а также относительного порога обнаружения по уровню. Вид выражений полностью совпадает с полученным в предыдущих работах [6] [7].

В двухпороговом обнаружителе характеристика ожидания получена в диапазоне значений $P_{\text{ЛТ}} \leq 10^{-1}$, что достаточно для определения порогов по уровню и длительности по заданным величинам T_0 и $P_{\text{ЛТ}}$. Относительное время ожидания $f_n T_0$ ограничено снизу и должно находиться в диапазоне $f_n T_0 \geq 5$.

Характеристика ожидания отличается от полученных ранее в [8] и [6] большей зависимостью от $f_n T_0$. Причина – уточненная вероятностная модель появления множества выбросов длительностью $\tau < \tau_0$ на интервале ожидания.

Характеристика обнаружения в двухпороговом обнаружителе получена в диапазоне значений

$P_{\text{по}} \geq 0.9$, что достаточно для определения индикаторной аппаратной чувствительности обнаружителя. Выражение характеристики полностью совпадает с полученным в [7].

В целом, разработана вероятностная основа методики проектирования и оценки чувствительности обнаружителей, работающих непрерывно на конечных интервалах времени.

Литература

1. Егоров С.Б., Горбачев Р.И., Менькова А.Л. Вероятностная характеристика обнаружения и аппаратная чувствительность обнаружителя движущегося источника шумоизлучения // Морские интеллектуальные технологии, Т. 1, № 2, 2023. С. 168-174.
2. Егоров С.Б. Энергетические обнаружители шумовых акустических сигналов. СПб: СПбГМТУ, 2016.
3. Денисенко А.Н. Сигналы. Теоретическая радиотехника. Справочное пособие. М.: Горячая линия-Телеком, 2005.
4. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. Радио, 1974.
5. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. 13-е изд. М.: URSS, 2022.
6. Егоров С.Б., Горбачев Р.И. Вероятностная характеристика обнаружения и порог чувствительности обнаружителя шумового сигнала с селектором выбросов по длительности // Морские Интеллектуальные Технологии, Т. 3, № 4, 2020. С. 176-183.
7. Егоров С.Б., Горбачев Р.И. Вероятностная характеристика обнаружения сигнала в обнаружителе с порогам по уровню и длительности // Морские интеллектуальные технологии, Т. 1, № 1, 2023. С. 212-218.
8. Егоров С.Б., Горбачев Р.И. Вероятностная характеристика ожидания сигнала в двухпороговом обнаружителе // Морские интеллектуальные технологии, Т. 1, № 4, 2022. С. 156-161.

References

1. Egorov S.B., Gorbachev R.I., Menkova A.L. Veroyatnostnaya karakteristika obnaruzheniya i apparatnaya chuvstvitel'nost' obnaruzhitelya dvizhushhegosya istochnika shumozlucheniya [Probabilistic detection characteristics and system sensitivity of the detector of a moving noise source] // Marine intellectual technologies, Vol. 1, No. 2, 2023. pp. 168-174.
2. Egorov S.B. E'nergeticheskie obnaruzhiteli shumovy`x akusticheskix signalov [Hydroacoustic signals energy detectors]. SPb: SPbGMTU, 2016.
3. Denisenko A.N. Signaly`. Teoreticheskaya radiotexnika. Spravochnoe posobie. [Signals. Theoretical radio engineering. Reference guide]. M.: Goryachaya liniya - Telekom, 2005.
4. Levin B.R. Teoreticheskie osnovy` statisticheskoy radiotexniki [Theoretical basics of statistical radio engineering]. M.: Sov. Radio, 1974.
5. Gnedenko B. Kurs teorii veroyatnostej [Probability Theory course]. 6th ed. M.: URSS, 2022.
6. Egorov S.B., Gorbachev R.I. Veroyatnostnaya karakteristika obnaruzheniya i porog chuvstvitel'nosti obnaruzhitelya shumovogo signala s selektorom vy`brosov po dlitel'nosti [Probability characteristics and sensitivity of wideband noise-like signal detector] // Marine intellectual technologies, Vol. 3, No. 4, 2020. pp. 176-183.
7. Egorov S.B., Gorbachev R.I. Veroyatnostnaya karakteristika obnaruzheniya signala v obnaruzhitеле s porogami po urovnyu i dlitel'nosti [Probability function of detection for signal detector with level and time thresholds] // Marine intellectual technologies, Vol. 1, No. 1, 2023. pp. 212-218.
8. Egorov S.B., Gorbachev R.I. Veroyatnostnaya karakteristika ozhidaniya signala v dvuxporogovom obnrauzhitеле [Probability function of waiting for double threshold detector] // Morskie Intellektual'ny'e Tekhnologii, Vol. 1, No. 4, 2022. pp. 156-161.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ О АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Станислав Борисович Егоров, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры морских информационных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, e-mail: Stanislav.Egorov.1938@gmail.com

Stanislav B. Egorov, Ph.D. (Eng), assistant professor, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: Stanislav.Egorov.1938@gmail.com

Роман Игоревич Горбачев, ассистент кафедры морских информационных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: gorbatschow.r@gmail.com

Roman I. Gorbachev, graduate student, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: gorbatschow.r@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.08.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 14.08.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 15.08.2023.

Научная статья

УДК 614.842, 519.8, 621.397.13

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.015>

Экологическая безопасность: современные технологии обнаружения аварийных разливов нефтепродуктов на морской поверхности

И.Г. Малыгин¹ malygin_com@mail.ru, Ш.С. Фахми^{1,2} shakeebf@mail.ru, О.А. Королев¹ korolev@iptran.ru

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук;

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы разливов нефтепродуктов на морской поверхности и предлагаются инструменты их обнаружения для совершенствования процесса мониторинга и дальнейшей ликвидации последствий. На основе статистических данных анализируются основные источники и главные причины возникновения разливов нефти. Предлагаются современные технологии и методы мониторинга загрязнений, которые позволяют обнаруживать и контролировать разливы нефтепродуктов с целью обеспечения экологической безопасности морской среды. Особое внимание в работе уделяется новым методам обнаружения разливов нефти, основанным на обработке изображений, получаемых со спутников, камер беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и других источников фото- и видеофиксации. Анализируется их потенциал для повышения эффективности мониторинга и оперативности реагирования при локализации инцидентов за счет повышения ситуационной осведомленности оперативных служб Минтранса и МЧС России, что позволяет минимизировать последствия происшествий. Применение предложенных авторами методов обработки изображений позволяет снизить риски возникновения чрезвычайных ситуаций и минимизировать негативные последствия разливов нефтепродуктов на морскую экосистему.

Ключевые слова: экологическая безопасность, сегментация, обнаружение, разлив нефтепродуктов, анализ изображений, вычислительная сложность, алгоритм

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: Малыгин И.Г., Фахми Ш.С., Королев О.А. Экологическая безопасность: современные технологии обнаружения аварийных разливов нефтепродуктов на морской поверхности // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 155—162. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.015

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.015>

Environmental safety: modern technologies for detecting accidental oil spills on the sea surface

Igor G. Malygin¹ malygin_com@mail.ru, Shakeeb S. Fahmi^{1,2} shakeebf@mail.ru, Oleg A. Korolev¹ korolev@iptran.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences, Russian Federation;

²Saint Petersburg Electrotechnical University, Russian Federation

Abstract. The article deals with the problems of oil spills on the sea surface and suggests tools for their detection to improve the monitoring process. Based on statistical data, the main sources and main causes of oil spills are analyzed. Modern technologies and methods of pollution monitoring are proposed, which allow detecting and controlling oil spills in order to ensure the environmental safety of the marine environment. Particular attention is paid to new methods for detecting oil spills, based on the processing of images obtained from satellites, cameras of unmanned aerial vehicles (UAVs) and other sources of photo and video recording. Their potential is analyzed to improve the efficiency of monitoring and promptness of response when localizing incidents by increasing the situational awareness of operational services in the Central Control Center of the Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia, which allows minimizing the consequences of incidents. The use of image processing methods proposed by the authors will reduce the risks of incidents and minimize the negative consequences of oil spills on the marine ecosystem and society as a whole.

Key words environmental safety, segmentation, detection, oil spill, image analysis, computational complexity, algorithm

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: Igor G. Malygin, Shakeeb S. Fahmi, Oleg A. Korolev Environmental safety: modern technologies for detecting accidental oil spills on the sea surface // Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 1, P. 155—162. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.015

Введение

Несмотря на возрастающую в последнее десятилетие роль альтернативных источников энергии на текущий момент нефть является главным энергетическим ресурсом в мировой экономике и ее использование определяет уровень экономического развития и качество жизни современного общества. Однако, вместе с этим добыча в открытом море и транспортировка нефтепродуктов морским путем связана с серьезными экологическими рисками. Разливы нефтепродуктов создают угрозу морской экосистеме и биоразнообразию, а также наносят значительный ущерб рыболовству, туризму и другим морским отраслям. Помимо этого, разливы нефти оказывают долгосрочное негативное воздействие на здоровье людей, морскую фауну и флору.

В контексте растущего мирового спроса на нефть, формирующего потребность в увеличении объемов добычи и транспортировки углеводородов, а следовательно, и количества эксплуатируемых нефтеналивных судов, нефтяных платформ и терминалов, повышается вероятность возникновения аварий, разливов и экологических катастроф с их участием. В связи с этим первоочередной задачей при добыче и транспортировке нефтепродуктов морским путем является развитие и внедрение современных технологий мониторинга, в том числе посредством видеомониторинга, обеспечивающих своевременное обнаружение нефтяных пятен, их локализацию. Это позволит повысить ситуационную осведомленность и скорость принятия решений оперативных служб Минтранса и МЧС России и минимизировать последствия аварий.

В данной статье рассмотрены проблемы разливов нефтепродуктов на морской поверхности. На основе статистических данных и выполненных исследований проанализированы основные источники и главные причины их возникновения, а также предложены современные методы мониторинга загрязнений, которые помогают обнаруживать и контролировать разливы нефти для обеспечения экологической безопасности морской среды. В статье предложены новые методы обнаружения разливов нефти на основе обработки изображений, получаемых со спутников и передаваемых с камер БПЛА, а также других

доступных источников фото- и видеофиксации, применение которых позволит повысить эффективность мониторинга и скорость реагирования за счет своевременной локализации чрезвычайной ситуации (ЧС).

Источники и причины поступления нефтепродуктов в морскую среду

Анализ работ по исследованию причин возникновения и определению основных источников и механизмов поступления углеводородов в морскую среду, проводимых в России и за рубежом [1-5] показывает, что нефть и нефтепродукты являются одними из основных загрязнителей вод Мирового океана. Оценки негативного воздействия углеводородов на окружающую среду и человека, расчеты экологического и экономического ущерба от добычи, транспортировки, переработки и использования нефти и нефтепродуктов публикуются в ежегодных отчетах нефтяных компаний, приводятся в аналитических отчетах мировых организаций и агентств, занимающихся экологическим мониторингом в области добычи, транспортировки, переработки и использования нефти и нефтепродуктов, отчетах надзорных органов и т.д. В нашей стране, согласно данным МЧС России ежегодно публикуемым в материалах Государственных докладов о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера за период с 2013 по 2022 г. [6], ЧС, связанные с аварийными разливами (выбросами) нефти и нефтепродуктов как на суше, так и на поверхности многочисленных акваторий морских и пресноводных объектов Российской Федерации, ежегодно наносят стране значительный экономический и экологический ущерб. Аварийные разливы являются одним из основных источников антропогенного загрязнения окружающей среды и негативного воздействия на живую природу и человека (см. табл.). По оценкам National Academy of Sciences, приведенным в отчете «Нефть в море IV» [2], основными причинами попадания нефти и продуктов нефтепереработки в морскую среду являются естественные источники и антропогенная деятельность.

Таблица

Сведения о количестве чрезвычайных ситуаций за период 2013 – 2022 гг., связанных с разливами (выбросами) нефти и нефтепродуктов в России, и величине причиненного материального ущерба

Наименование источника чрезвычайной ситуации	Материальный ущерб, млн руб. (количество ЧС, ед.)									
	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Аварии с разливом (выбросом) нефти (нефтепродуктов)	93,62* (10)	43,6* (5)	24,508* (6)	53,754* (5)	0* (3)	20,805* (11)	86,776* (4)	148 720,861* (10)	628,959 (6)	110,486** (8)

* – до 2021 года сбор сведений не предусмотрен структурой ежегодного Государственного доклада МЧС России «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»;

** – с 2022 года сбор сведений не предусмотрен структурой ежегодного Государственного доклада МЧС России «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

К естественным относятся так называемые «сипы» или донные просачивания углеводородов, доля которых от общего годового объема поступлений нефтепродуктов в морскую среду составляет по разным оценкам от 20 до 40 процентов. При этом среди антропогенных источников максимальный вклад в общий объем загрязнений Мирового океана вносят наземные стоки (бассейны рек, выпадение сильных атмосферных осадков), связанные с потреблением нефтепродуктов (10-30 %), а также нефтедобывающая деятельность (5-10 %) и транспортировка нефти (10-20%).

На суше главным источником загрязнения является деятельность человека, связанная с потреблением нефти, в результате которой различные виды загрязняющих углеводородов – продуктов нефтепереработки (топливо, различные виды горюче-смазочных веществ, частицы автомобильных шин и т.д.) поступают в морскую

среду посредством сточных вод с прибрежных зон, формируемых сильными атмосферными осадками, и вод бассейнов рек, протекающих вдоль урбанизированных территорий. Также свой негативный вклад вносит деятельность морских торговых портов, нефтеперерабатывающих заводов и терминалов, располагаемых в прибрежных зонах, сброс авиационного топлива, а также штатные операции и сбросы с судов.

Добыча нефти в море и её транспортировка составляют третей по объему источник загрязнения морской среды, которые сопровождаются разливами нефти в результате аварий на нефтедобывающих платформах и нефтепроводах, сбросом пластовых вод при бурении нефтедобывающих скважин, аварии нефтеналивных танкеров, утечка топлива с затонувших судов и выбросы от судоходства и т.д. (см. рис. 1).

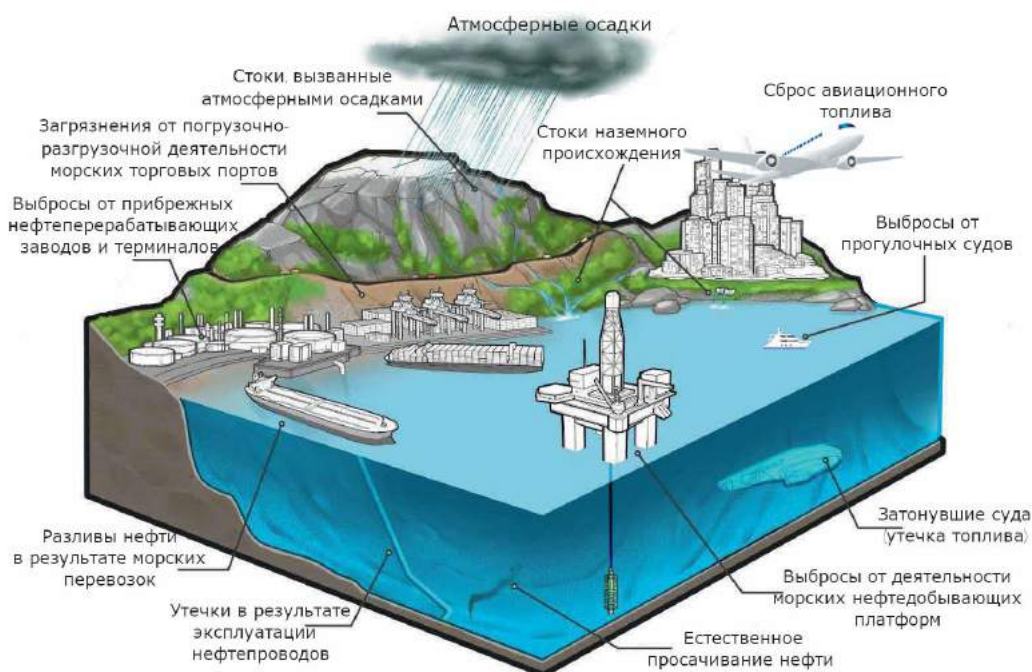


Рис. 1. Источники поступления нефти и нефтепродуктов в морскую среду

Описание метода обнаружения на изображениях морских поверхностей нефтяных загрязнений

С развитием технологий дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) в различных областях народного хозяйства использование изображений, полученных с их помощью, становится все более доступным и актуальным способом получения информации, в том числе для мониторинга и обнаружения нефтяных пятен. Эти изображения демонстрируют высокое пространственное и временное разделение, обладают большим охватом, обеспечивают непрерывную доступность данных [7]. Например, получаемые с помощью активных микроволновых датчиков радарного типа SAR (синтетическая апертурная радиолокация) изображения высокого разрешения не зависят от погодных условий, таких как туман, облака и дождь, и могут быть использованы для круглосуточного мониторинга морских территорий. Однако, в связи с

доступностью и широким распространением именно оптические изображения (полутоновые, черно-белые и цветные) в настоящее время являются наиболее популярным форматом для фиксации нефтяных разливов.

В настоящее время для создания морских видеосистем на кристалле (МВСНК) наиболее востребованы миниатюрные интеллектуальные устройства с архитектурой ARM-ядра процессора. Эта архитектура с одной стороны позволяет реализовать достаточно сложные алгоритмы видеонализа, а с другой не требует больших вычислительных ресурсов. Следует отметить, несмотря на развитие технологий, основанных на методах и алгоритмах работы искусственного интеллекта и искусственного зрения, которые становятся все более популярными в связи с появлением сверточных нейронных сетей (СНС) [8], для их функционирования требуются существенные

вычислительные ресурсы, что не всегда может быть реализовано на практике [9,10].

При этом применение МВСНК в задачах обеспечения экологической безопасности обладает рядом преимуществ:

а) обнаружение разлива и нефтяных пятен на ранних стадиях;

б) вычисление координат и периметра областей загрязнения;

в) использование относительно простых алгоритмов анализа видеоинформации в отличие от СНС;

г) применение двух и более видеокамер позволяет определять расстояние и фиксировать места загрязнения с большей точностью;

д) обеспечение эффективной ситуационной осведомленности мониторинговых центров в реальном времени.

Обработка изображений предполагает их представление в одном из цифровых форматов, например, RGB и YCbCr, являющихся одними из наиболее распространенных. В формате RGB каждый пиксель описывается тройкой значений интенсивности для красного (R), зеленого (G) и синего (B) компонентов, каждый из которых может принимать значения от 0 до 255, что дает 256 возможных оттенков для каждого цвета. Комбинируя значения R, G и B в каждом пикселе, можно получить широкий спектр цветов, количество возможных комбинаций которых составляет 256 x 256 x 256, что равно 16 777 216 градаций цветовых яркостей.

Формат YCbCr (или YUV) нашел широкое применение в цифровой видеообработке и сжатии. В формате YCbCr цветовая информация разделена на яркостную составляющую (Y) и две цветоразностные (Cb и Cr). Этот формат позволяет эффективнее кодировать видео и учитывать особенности человеческого зрения при сжатии видеоданных.

Оба этих формата имеют свои преимущества и недостатки и используются в разных областях цифровой обработки изображений и видео. Выбор между форматами зависит от конкретного применения и требований проекта.

Предлагаемый метод обнаружения разлива нефти включает следующие основные шаги:

- преобразование форматов исходной видеоинформации;

- сегментацию полутоновых изображений;

- оценку основных показателей качества МВСНК: сложности, битовой скорости передачи и точности обнаружения.

Рассмотрим по отдельности каждый из перечисленных этапов.

1. В ходе исследования на начальном этапе анализа исходной видеоинформации применялись алгоритмы преобразования форматов RGB и YCbCr для обеспечения более универсального и точного определения координат и периметра областей загрязнения с использованием модели HSL - Hue, Saturation, Lightness (Hue - цветовой тон, т.е. оттенок цвета; Saturation - насыщенность; Lightness - светлота цвета, при этом, чем выше значение этого параметра, тем светлее цвет (100% - белый, 0% - черный).

Для конвертации из RGB в цветовую модель HSL применялись следующие формулы:

$$L = \frac{Max(R', G', B') + Min(R', G', B')}{2}$$

$$S = \begin{cases} 0, \text{ если } Max(R', G', B') = Min(R', G', B') \\ \frac{Max(R', G', B') - Min(R', G', B')}{Max(R', G', B') + Min(R', G', B')}, \text{ если } L \leq 0.5 \\ \frac{Max(R', G', B') - Min(R', G', B')}{2 - Max(R', G', B') - Min(R', G', B')}, \text{ если } L > 0.5 \end{cases}$$

$$H = \begin{cases} 0, \text{ если } Max(R', G', B') = Min(R', G', B') \\ 60^\circ \times \frac{G' - B'}{Max(R', G', B') - Min(R', G', B')}, \text{ если } Max(R', G', B') = R' \\ 60^\circ \times \left(2 + \frac{B' - R'}{Max(R', G', B') - Min(R', G', B')} \right), \text{ если } Max(R', G', B') = G' \\ 60^\circ \times \left(4 + \frac{R' - G'}{Max(R', G', B') - Min(R', G', B')} \right), \text{ если } Max(R', G', B') = B' \end{cases}$$

При этом, если H принимает отрицательное значение, к полученному значению добавляется 360°.

Преобразование цвета из одного стандарта в другой выполняется на основе определенных соотношений в векторном пространстве цветов:

$R' = \frac{R}{255}$, $G' = \frac{G}{255}$, $B' = \frac{B}{255}$ - величины яркостей в цветовом пространстве RGB, находящиеся в интервале [0; 1]. Min, Max - минимум и максимум из значений трех компонент (R', G', B') соответственно, H - тон [0; 360], S - интенсивность или насыщенность [0; 1], L - светлота [0; 1].

Для преобразования RGB в формат YCbCr и полутоновые черно-белые изображения также используются нормированные значения цветовых компонент $R' = \frac{R}{255}$, $G' = \frac{G}{255}$, $B' = \frac{B}{255}$.

Вычисление значения яркости Y, определяющего вклад цвета в яркость, выполняются по формуле:

$$Y = 0.2989 * R' + 0.5866 * G' + 0.1145 * B'$$

Вычисление цветовых компонент Cb и Cr, которые представляют различия между цветом и яркостью для синей и красной составляющих соответственно, выполняются, используя выражения:

$$C_b = \frac{1}{2} (B' - Y) * \frac{1}{1 - 0.1145}$$

$$C_r = \frac{1}{2} (R' - Y) * \frac{1}{1 - 0.2989}$$

2. Сегментация полутоновых изображений. Важной задачей для обнаружения и распознавания объектов мониторинга (нефтяных пятен на морской поверхности, при обработке видеоинформации, полученной от источников ДЗЗ) является пороговая сегментация. Сегментация заключается в отделении областей, характеризующих объекты на исходном изображении, и присвоении каждой области определенной константы, тем самым упрощая процесс анализа изображения.

Следует отметить, что предлагаемый авторами способ выполнения операции сегментации отличается от используемых в известных работах

[11, 12] применением локального и глобального порогов по яркости.

Глобальный порог позволяет разделить исходное изображение на две области, включающие требуемый объект и фон, без учета мелких деталей, поиск которых выполняется с использованием локального порога. Последний обеспечивает более детальный анализ изображения, позволяя определить на изображении координаты и форму разлива нефтяного пятна, разделив в конечном итоге изображение на несколько важных областей.

Фиксация и выделение области разлива, и определение его характеристик (цвет, координаты, размер, уровень, площадь, периметр, контур и т.д.) реализованы путём формирования множества активных пикселей, имеющих одни и те же признаки или свойства.

В работе применяется подход сегментации по порогу (thresholding) на основе гистограммы распределения яркостей. Ключевым моментом пороговой сегментации является определение порога.

Математическое значение порога показано на рисунке 2. В качестве метода выбора порога можно использовать предложенный авторами в работе [11, 12] метод, который теоретически имеет наименьшую вероятность неправильной классификации, а именно: метод максимальной межклассовой дисперсии. Этот метод делит все пиксели на изображении на две категории: меньше порогового значения и больше либо равно пороговому значению.

Решение задачи автоматического выделения областей загрязнения Мирового океана заключается в правильном выборе нужных пороговых значений (ρ) для указанных областей при различных условиях шума и помех (гауссовый шум, освещённость, атмосферные осадки: туман, дождь, снег и др.) путём вычисления пиковых значений интенсивности на этапе построения гистограммы исходного изображения по трём компонентам R, G и B (см. рис. 2).

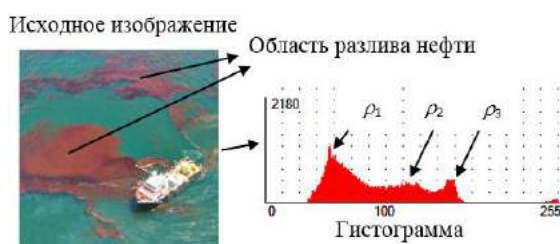


Рис. 2. Снимок разлива нефти, полученный с помощью БПЛА, и результат построения RGB гистограммы с приведенными пороговыми значениями для выполнения сегментации

Важно упомянуть, что не существует универсальных алгоритмов, подавляющих все виды помех и шумов. Однако большую часть шумов можно отнести к модели белого гауссовского шума, следовательно, большинство процедур удаления помех ориентировано на подавление именно этого вида шума.

Определение оптимальных величин пороговых значений осуществляется группировкой всех значений яркостей по гистограмме с учетом пиковых столбиков, являющихся статистическими модами. В данном случае мода представляет собой яркость с максимальной частотой для конкретной области изображения.

Таким образом, определение координат разлива нефти осуществляется с помощью гистограммы яркостей компонентов, составляющих цвет пикселя, путём формирования порогов, например:

а) порог, позволяющий определить максимально охваченную область разлива;

б) порог, позволяющий фиксировать области морского фона;

в) порог для определения морского объекта и т.д.

Данный алгоритм основан на предположении, что разлив нефти на изображении может отображать любой пиксель, у которого интенсивность красной составляющей цвета больше значений зеленой и синей компоненты.

Пиксели, которые образуют центр разлива, имеют наибольшую интенсивность с доминирующей красной составляющей цвета (значение этой интенсивности фиксируется максимальным порогом). Минимальным порогом соответственно считаем наименьшую интенсивность доминирующего красно-коричневого цвета.

Алгоритм обнаружения в процессе обработки ДЗЗ снимка фиксирует эти два порога с возможностью управления выводом информации о характеристиках области загрязнения параллельно с вычислением занимаемой площади для каждой области. При этом при программной реализации алгоритма может быть предусмотрена дополнительная функция для определения статистических показателей характеристик областей нефтяного пятна, морской поверхности и морского судна, таких как количество пикселей, яркость, дисперсия и т.п.

Алгоритм обнаружения и обработки нефтяных пятен

Алгоритм обнаружения и исследования разлива нефти включает следующие основные этапы, приведенные на рисунке 3:

- 1) приём, подготовка и инициализации параметров МВСНК обнаружения нефтяных пятен;
- 2) формирование и первичная обработки видеоданных;
- 3) фильтрация исходного изображения от помех и шумов;
- 4) исследование и структурирование объектов изображений для формирования списка характеристик нефтяных пятен с учетом специфики снимков ДЗЗ;
- 5) анализ и исследование области загрязнения океана. Данная процедура является основной и содержит функции, позволяющие определить основные характеристики нефтяных пятен, а именно: сегментацию, выделение границ объектов, фильтрацию и вычисление характеристик областей нефтяного загрязнения;
- 6) выдача результатов и сигналов тревоги для оперативных служб Минтранса и МЧС России.

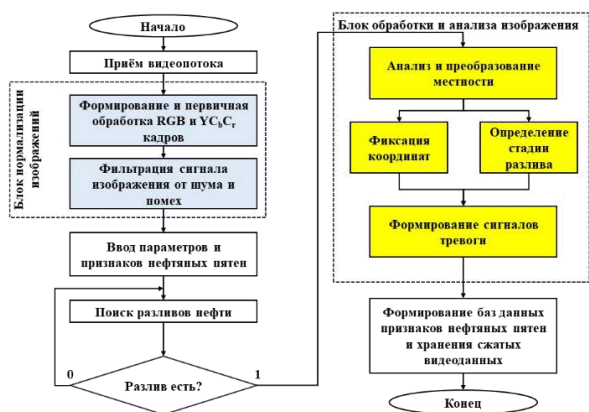


Рис. 3. Обобщенная блок-схема алгоритма обнаружения областей нефтяного загрязнения морской поверхности

Предложенный алгоритм позволяет реализовать процедуру и порядок выполнения предупредительных (профилактических) мероприятий, позволяющих минимизировать последствия разлива нефти, а также повысить ситуационную осведомленность и оперативность принятия решений оперативных служб.

Следует отметить, что для эффективной процедуры мониторинга и контроля состояния морской поверхности на предмет обнаружения морских происшествий с разливом нефтепродуктов и отслеживания динамики развития инцидента необходимо обеспечить доставку непрерывного потока видеoinформации с камер БПЛА, технических средств ДЗЗ и других доступных средств видеофиксации в МВСНК в реальном времени.

Результаты моделирования процессов анализа и обнаружения нефтяных загрязнений на морской поверхности

Для проведения эксперимента и проверки предложенного метода и алгоритмов его реализации использован набор изображений разливов нефтепродуктов, произошедших в результате аварий на нефтеналивных танкерах, с разными уровнями помех и шума.

На рисунке 4 приведены примеры обработки выбранных 3-х изображений с помощью предложенных авторами алгоритмов выделения областей нефтяного загрязнения, морской поверхности (фона) и морских судов. Результаты вычисления точности обнаружения областей нефтяных загрязнений и вычислительная сложность соответствующих алгоритмов показаны на рисунке 5.

Результаты моделирования показывают, что точность обнаружения сильно зависит от степени зашумленности. В качестве шумовых помех на обрабатываемых изображениях были рассмотрены такие атмосферные явления, как сильный туман и облачность. При этом рассматривались случаи с 10% и 80% перекрытием области нефтяного загрязнения соответственно (см. рисунок 5а). А для оценки сложности алгоритмов анализа изображения были рассмотрены варианты, при которых площадь нефтяного пятна составляла 10% от общей площади изображения, и когда нефтяное пятно занимало 80% площади исходного изображения (см. рисунок 5б).

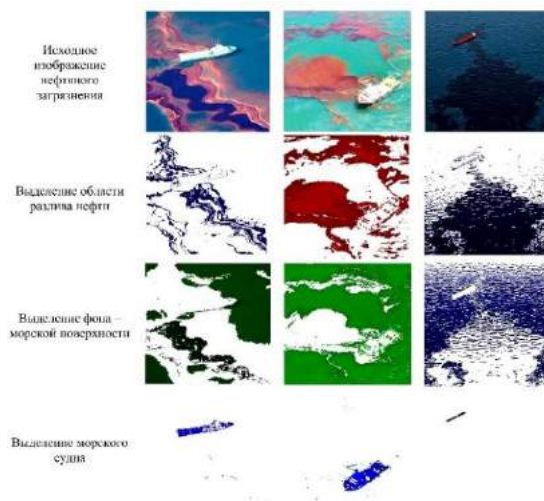


Рис. 4. Результаты выделения областей нефтяных загрязнений, морской поверхности (фона) и морских судов

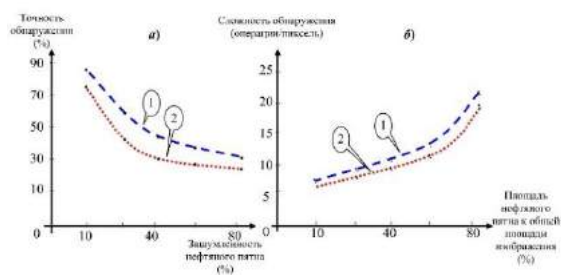


Рис. 5. Зависимости точности обнаружения нефтяного пятна от зашумленности изображения (а) и сложности обнаружения от отношения площади нефтяного пятна к общей площади изображения (б) алгоритм выделения границ; алгоритм сегментации

Заключение

В статье показано, что нефть и нефтепродукты являются значимыми источниками загрязнения окружающей среды и водных ресурсов в России и в мире в целом. Чрезвычайные ситуации, связанные с разливами и выбросами нефти и нефтепродуктов, сопряжены с существенными экологическим и экономическим ущербом. В работе авторами проанализированы публикуемые в России и за рубежом аналитические материалы экологического мониторинга в области добычи, транспортировки, переработки и использования нефти и нефтепродуктов. На основании анализа установлены основные источники нефтяных загрязнений морской среды и приведены данные о материальном ущербе, понесенном Россией за период с 2013 по 2022 гг. Для повышения экологической безопасности на море и снижения экологического урона, причиняемого окружающей среде разливами нефти и нефтепродуктами, авторами предложен новый метод и алгоритм обнаружения нефтяных загрязнений на морской поверхности, которые позволят усовершенствовать существующие системы видеомониторинга, обеспечат своевременное обнаружение, распознавание и классификацию нефтяных пятен. Это позволит разрабатывать более эффективные стратегии предотвращения,

реагирования и ликвидации разливов, а также развигать новые технологии и методы мониторинга для обеспечения экологической безопасности морской среды. Предложенный метод, использует двухпороговую сегментацию полутоновых изображений, полученных в результате преобразования исходных изображений. Он позволяет определить координаты нефтяного пятна с помощью гистограммы яркостей компонентов, составляющих цвет пикселя, путём формирования порогов для максимального охвата области разлива, фиксации морской поверхности или фона, а также определения объекта мониторинга, например, аварийного нефтеналивного танкера.

В результате компьютерного моделирования реализации предложенного метода на примере двух алгоритмов: сегментации и выделения границ, были построены зависимости точности обнаружения нефтяного пятна от зашумлённости изображения и сложности обнаружения от отношения площади нефтяного пятна к общей площади изображения, представленные на рисунке 5. Выполненная оценка вычислительных затрат данного метода, позволяет сделать вывод о возможности его аппаратной реализации с помощью технологии «система на кристалле» и применения на борту БПЛА, которые могут быть использованы как источники непрерывной видеоинформации для МВСНК.

Литература

1. Экологический отчет ПАО «ГАЗПРОМ» за 2022 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gazprom.ru/> (дата обращения 01.08.2023).
2. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Oil in the Sea IV: Inputs, Fates, and Effects. - Washington, DC: The National Academies Press, 2022. – 516 p. DOI:10.17226/26410.
3. Коршунова Т.Ю., Логинов О.Н. Нефтяное загрязнение водной среды: особенности, влияние на различные объекты гидросферы, основные методы очистки // Экобиотех. – 2019. – Том 2, № 2. – С. 157-174.
4. Владимиров В.А. Разливы нефти: причины, масштабы, последствия // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2014. – Т. 4, № 1(6). – С. 217-229.
5. Владимиров А.М., Ляхин Ю.И., Матвеев Л.Т., Орлов В.Г. Охрана окружающей среды. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 424 с.
6. Государственные доклады о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера за период с 2013 по 2022 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/> (дата обращения 01.08.2023).
7. Hassani B., Sahebi M.R., Asiyabi R.M. Oil spill four Class classification using UAVSAR polarimetric data // Ocean Science Journal. – 2020. – № 55. – pp. 433-443.
8. Guo H., Wu D., An J. Discrimination of oil slicks and lookalikes in polarimetric SAR images using CNN // Sensors. – 2017. – №17. – 1837 p.
9. Фахми Ш.С., Малыгин И.Г., Егоршев С.М., Крылов Ю.Е. Когнитивные транспортные видеосистемы // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – № 4-1 (50). – С. 142-154.
10. Фахми Ш.С., Малыгин И.Г., Королев О.А. Аппаратная реализация приложения обработки изображений транспортных объектов на основе технологии «система на кристалле» // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2022. – № 4. – С. 50-55.
11. Крюкова М.С., Фахми Ш.С. Сегментация полутоновых изображений лесных пожаров на основе дисперсионного анализа // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2019. – № 3. – С. 103-111.
12. Фахми Ш.С., Королев О.А., Бородина О.В. Новый алгоритм обнаружения и выделения морских объектов от фона в системах наблюдения // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – Т.1, № 3. – С. 256-264.

References

1. GAZPROM's Environmental Report for 2022 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.gazprom.ru/> (accessed 01.08.2023).
2. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Oil in the Sea IV: Inputs, Fates, and Effects. - Washington, DC: The National Academies Press, 2022. – 516 p. DOI:10.17226/26410.
3. Korshunova T.YU., Loginov O.N. Neftyanoye zagryazneniye vodnoy sredy: osobennosti, vliyaniye na razlichnyye ob"yekty gidrosfery, osnovnyye metody ochistki [Oil pollution of the aquatic environment: features, impact on various objects of the hydrosphere, basic cleaning methods] // Ekobiotech. – 2019. – Tom 2, № 2. – S. 157-174.
4. Vladimirov V. A. Razlivy nefiti: prichiny, masshtaby, posledstviya [Oil spills: causes, scales, consequences] // Strategiya grazhdanskoj zashchity: problemy i issledovaniya. – 2014. – T. 4, № 1(6). – S. 217-229.
5. Vladimirov A.M., Lyakhin Yu.I., Matveyev L.T., Orlov V.G. Okhrana okruzhayushchey sredy [Environmental protection]. – L.: Gidrometeoizdat, 1991. – 424 p.
6. State reports on the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies for the period from 2013 to 2022. [Electronic resource]. – Access mode: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/> (accessed 08/01/2023).
7. Hassani B., Sahebi M.R., Asiyabi R.M. Oil spill four Class classification using UAVSAR polarimetric data // Ocean Science Journal. – 2020. – № 55. – pp. 433-443.
8. Guo H., Wu D., An J. Discrimination of oil slicks and lookalikes in polarimetric SAR images using CNN // Sensors. – 2017. – №17. – 1837 p.
9. Fahmi Sh.S., Malygin I.G., Egorshch S.M., Krylov E.Y. Cognitive transport video systems // Marine intellectual technologies. – 2020 – Vol. 1. – № 4. – pp. 142 – 154.
10. Fahmi Sh.S., Malygin I.G., Korolev O.A. Apparattnaya realizatsiya prilozheniya obrabotki izobrazheniy transportnykh ob"yektov na osnove tekhnologii «sistema na kristalle» [Hardware implementation of an image processing

- application based on the «system on a chip» technology] // Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES). – 2022. – № 4. – S. 50-55.
11. Kryukova M.S., Fakhmi Sh.S. Segmentatsiya polutonyovykh izobrazheniy lesnykh pozharov na osnove dispersionnogo analiza [Segmentation of grayscale images of forest fires based on dispersion analysis] // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MCHS Rossii. – 2019. – № 3. – S. 103-111.
12. Fahmi Sh.S., Korolev O.A., Borodina O.V. A new algorithm for detecting and separating marine objects from the background in surveillance systems // Marine intellectual technologies. – 2022. – Vol.1., №3. – pp. 256-264.

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

Игорь Геннадьевич Малыгин, доктор технических наук, профессор, директор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13. Тел. +7(812) 323-29-54, e-mail: malygin_com@mail.ru

Шакиб Субхиевич Факми, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории интеллектуальных транспортных систем, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13. Тел. +7(812) 321-95-68
Профессор кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус 1, помещение 11-53. Тел. +7(812) 234-36-75. e-mail: shakeebf@mail.ru

Олег Александрович Королев, кандидат технических наук, ученый секретарь, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, В.О. 12 линия, 13. Тел. +7(812) 323-29-54, e-mail: korolev@iptran.ru

Igor G. Malygin, professor, Dr. Sci. (Eng), director, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 12-th Line VO, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. Tel. +7(812)323-29-54, e-mail: malygin_com@mail.ru

Shakeeb S. Fahmi, Dr.Sci. (Eng), assistant professor, leading researcher of the Laboratory of Intelligent transport systems, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 12-th Line VO, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. Tel. +7(812) 321-95-68, e-mail: shakeebf@mail.ru
Professor of the Department of computer-aided design, Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI', room 11-53, building 1, 5, Professor Popov str., St. Petersburg, 197376, Russian Federation. Tel. +7(812) 234-36-75, e-mail: shakeebf@mail.ru

Oleg A. Korolev, PhD (Eng), scientific secretary, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 12-th Line VO, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. Tel. +7(812)323-29-54, e-mail: korolev@iptran.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.07.2023.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 12.08.2023.
Принята к публикации/accepted for publication 15.08.2023

Научная статья

УДК 656.6.058; 681.323

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.016>

Теоретические основы оптимального наблюдения параметров работы объектов инфраструктуры Арктического региона и Северного морского пути

В.Ю. Каминский¹ Kaminskyvy@yandex.ru, Д.А. Скороходов¹ skorohodda@mail.ru,
В.В. Васьков¹ uprds@gov.spb.ru

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. Сложность объектов инфраструктуры Арктического региона и Северного морского пути, их разнообразный характер и многообразие измеряемых параметров, необходимых для контроля, диагностики и безопасного управления предполагает, что параметры, характеризующие техническое состояние и функционирование объектов, выраженные в виде математических зависимостей, адекватно отражают реальные физические связи между элементами инфраструктуры. Разработаны теоретические основы оптимизации измеряемых параметров, необходимых и достаточных для безопасной эксплуатации объектов инфраструктуры. Показано, что, анализируя физическое явление, можно представить его модель в любой системе координат. На практике для контроля технических процессов используют определённую координатную систему. Тем самым качество контроля и диагностирования физических параметров процесса определяется выбранной системой координат. Утверждается, что критериями выбора координатной системы являются возможность технической реализации измерения параметров и достаточная точность получаемых результатов. Показано, что такой подход позволяет обосновать критерий оценки эффективности используемой системы координат и обеспечивает возможность определения состава измеряемых параметров для безопасного контроля и управления объектами инфраструктуры.

Ключевые слова: Арктический, инфраструктура, морской объект, информация, управляющие решения, координатная система, критерий, контролируемое явление, 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., Васьков В.В. Теоретические основы оптимального наблюдения параметров работы объектов инфраструктуры Арктического региона и Северного морского пути, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 163—169. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.016

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.016>

The theoretical foundations of optimal monitoring of the parameters of the infrastructure of the Arctic region and the Northern Sea Route

Valery Yu. Kaminsky¹ Kaminskyvy@yandex.ru, Dmitriy A. Skorokhodov¹ skorohodda@mail.ru,
Viktor V. Vaskov¹ uprds@gov.spb.ru

¹Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences

Abstract. The complexity of the infrastructure facilities of the Arctic region and the Northern Sea Route, their diverse nature and the variety of measured parameters necessary for monitoring, diagnostics and safe management suggests that the parameters characterizing the technical condition and functioning of the facilities, expressed in the form of mathematical dependencies, adequately reflect the real physical connections between the infrastructure elements. The theoretical foundations of optimization of the measured parameters necessary and sufficient for the safe operation of infrastructure facilities have been developed. It is shown that by analyzing a physical phenomenon, it is possible to represent its model in any coordinate system. In practice, a certain coordinate system is used to control technical processes. Thus, the quality of monitoring and diagnostics of the physical parameters of the process is determined by the selected coordinate system. It is stated that the criteria for choosing a coordinate system are the possibility of technical implementation of parameter measurement and sufficient accuracy of the results obtained. It is shown that this approach makes it possible to theoretically substantiate the criterion for evaluating the effectiveness of the coordinate system used and provides the possibility of determining the composition of the measured parameters for the safe control and management of infrastructure facilities.

Key words: Arctic, infrastructure, marine object, information, control solutions, coordinate system, criterion, controlled phenomenon, 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, Viktor V. Vaskov Theoretical foundations of optimal monitoring of the parameters of the infrastructure of the Arctic region and the Northern Sea Route. I, 2023. № 3 part 1, P. 163—169. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.016

Введение

При эксплуатации объектов инфраструктуры Арктического региона и Северного морского пути важной процедурой является диагностирование технического состояния и поиск причин отказов объектов [1]. При решении задач диагностирования обслуживающий персонал вырабатывает решения на основе поступающей информации. Чрезмерное увеличение потока информации приводит к удорожанию систем технической диагностики и затрудняет работу персонала. С другой стороны, нехватка информации снижает эффективность принимаемых решений в условиях аварийной обстановки. Указанные противоречия порождают проблему выбора оптимального объема информации, поступающего к обслуживающему персоналу в процессе эксплуатации объектов инфраструктуры [2]. Необходимо также учитывать требования, предъявляемые к объему достоверной информации, для выработки эффективных и безопасных управляющих решений [3]. Учитывая повышенную сложность современных объектов инфраструктуры, приводящую к значительному росту числа контролируемых параметров, следует отметить актуальность проблемы.

Многообразие измеряемых параметров

Предварительный анализ объектов инфраструктуры (например, нефте- и газодобывающие платформы) показывает, что между параметрами, характеризующими их техническое состояние и функционирование, всегда существуют некоторые соотношения, которые отражают в виде математической зависимости реальные физические связи [4].

Предположим, что объект контроля в каждый момент времени характеризуется вектором x с координатами x_1, x_2, \dots, x_n и между ними имеет место соотношение

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0. \quad (1)$$

Множество S всех точек $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, удовлетворяющих уравнению (1), называется гиперповерхностью пространства X . Если функция f имеет в области изменения параметров G непрерывные частные производные по переменным x_1, x_2, \dots, x_n , то в каждой точке x области G определяется градиент функции

$$\text{grad } f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}; \frac{\partial f}{\partial x_2}; \dots; \frac{\partial f}{\partial x_n} \right). \quad (2)$$

Если уравнение (1) линейно, и хотя бы один из коэффициентов, стоящих перед переменной x_i , отличен от нуля, то в этом случае гиперповерхность представляет собой гиперплоскость.

Пусть имеется несколько гиперповерхностей S_1, S_2, \dots, S_h , каждая из которых отражает реально существующую физическую связь между

координатами x_i , которая задана в пространстве X , соответственно, уравнениями

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0; \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0; \\ f_h(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Пересечение всех этих M гиперповерхностей, т.е. множество точек $x \in X$, удовлетворяющих одновременно всем уравнениям (2), называется m -мерным многообразием в X ($m = n - h$), где h – количество уравнений f_i , если выполнено следующее условие: в каждой точке $x \in X$ векторы $\text{grad } f_1, \text{grad } f_2, \dots, \text{grad } f_h$ линейно независимы. Зависимость между градиентами $\text{grad } f_i$ и $\text{grad } f_k$ означает, что функции f_i и f_k отражают некоторое физическое явление, но записаны, например, в разных размерностях и, следовательно, одну из них следует исключить из системы (2).

Таким образом, m – мерное многообразие в X задается системой $(n - m)$ уравнений. Где $(n - 1)$ – мерное многообразие задается одним уравнением и совпадает с гиперповерхностью S .

Любое уравнение (1) связывает между собой векторы x_1, x_2, \dots, x_n . Любой из этих векторов, например вектор x_n , является комбинацией остальных векторов x_1, x_2, \dots, x_{n-1} . Следовательно пространство X , порожаемое векторами x_1, x_2, \dots, x_n совпадает с подпространством, порожаемым векторами x_1, x_2, \dots, x_{n-1} . Не изменяя пространства X можно исключить из системы порожаемых векторов всякий вектор, являющийся комбинацией остальных. Произведя такое исключение последовательно h раз, в соответствии с количеством уравнений (3), можно добиться того, что из первоначальной системы координат останутся только независимые между собой, порожающие пространство L размерности $n-h$.

При комбинировании исключаемых величин x_i правило преобразования координат [5] позволяет определить несколько групп независимых между собой векторов, называемых базисными, каждый из которых порождает подпространство L . Причём число независимых векторов одинаково и равно $(n-h)$ [6]. Таким образом количество независимых параметров, которые нужно выбрать и измерить для решения системы уравнений (3), определяются разностью общего количества всех переменных в уравнениях и числом этих уравнений. Все полученные при таком переборе базисы являются равноправными с точки зрения аффинных преобразований, т.е. таких преобразований, когда не учитывается метрика пространства. Количество всевозможных базисов определяется числом сочетаний C_n^{n-h} .

Реально существующее явление, отражаемое уравнением (2), не зависит от того, в какой системе координат оно рассматривается. В любой системе координат это явление можно физически истолковать. На практике для контроля технических процессов используют, как правило, какую - либо одну из возможных координатных систем.

В процессе контроля с каждым вектором, характеризующим точку, лежащую на гиперповерхности S , связываются его координаты, которые зависят уже не только от положения точки на гиперповерхности, но и от выбранной координатной системы. Тем самым при контроле и диагностировании анализируются данные, отражающие не только физическое явление, но и характер выбора системы координат.

Критериями выбора координатной системы являются возможность технической реализации измерения параметров и достаточная точность получаемых результатов [7]. Эти критерии существенно уменьшают количество всевозможных базисов, однако часто их число все ещё остаётся больше единицы, поэтому проблема выбора координат сохраняется.

Как уже отмечалось, возможные системы координат являются равноправными с точки зрения аффинных преобразований, но они не являются равноправными в метрике пространства. Каждой системе координат соответствует своё определённое расстояние между одними и теми же точками многообразия M . Влияние базиса на метрику пространства можно показать в рамках оценки изменения длины вектора x при переходе от одной координатной системы к другой.

Длина вектора в евклидовом пространстве (учитывающем метрику пространства) определяется квадратичной формой относительно координат x_1, x_2, \dots, x_n [8]:

$$|x|^2 = \sum_{i,k=1}^n S_{ik} \cdot x_i \cdot x_k, \quad (4)$$

где S_{ik} - скалярное произведение базисных векторов (e_i, e_k) . При $|e_i|=|e_k|=1$, $S_{ik} = \cos(e_i, e_k)$.

Для независимых векторов $S_{ii} = 1$, $S_{ik} = 0$ ($i \neq k$) и длина вектора определяется известным выражением:

$$|x|^2 = x_{12} + x_{22} + \dots + x_{n2}. \quad (5)$$

При переходе к новому базису Z_1, Z_2, \dots, Z_n вектор x равен:

$$x = a_1 \cdot z_1 + a_2 \cdot z_2 + \dots + a_n \cdot z_n. \quad (6)$$

Тогда выражение для квадрата длины вектора x в новой системе координат будет следующим:

$$|x|^2 = \sum c_{ik} \cdot a_i \cdot a \cdot x_k, \quad (7)$$

где коэффициенты c_{ik} определяются по формуле скалярного произведения векторов Z_i, Z_k : $c_{ik} = (Z_i, Z_k)$.

В зависимости от коэффициентов a_i в формуле перехода от одного базиса к другому длина вектора x в новом базисе может либо увеличиться, либо уменьшиться. Естественно предположить, что

лучшей будет та система координат, в которой длина вектора x больше.

Подводя итог сказанному, отметим, что в процессе контроля наблюдаемые параметры, характеризующие определённое физическое явление, изменяются не во всём пространстве X , а лишь в той его части, которая ограничивается m - мерным многообразием M и является подпространством L размерности $m = n - h$. Имеется определённое число базисов независимых векторов, порождающих пространство L , причём эти базисы не являются равноправными по отношению к метрике пространства.

Многообразие M в пространстве X занимает вполне определённое положение, зависящее от физических свойств контролируемых явлений. Поэтому, выбираем каждый раз систему координат в пространстве L для наблюдения за всеми точками m - мерного многообразия M в координатах пространства X . Ясно, что длина проекции зависит от взаимного расположения координатных осей и многообразия M .

Основной задачей является поиск существования такой системы координат, из числа реально существующих, в которых физическая сущность контролируемого явления проявляется наилучшим образом.

Обоснование критерия для оценки эффективности системы координат

Пусть в n - мерном пространстве X имеется m - мерное пространство M и подпространство L той же размерности. Рассмотрим в пространстве L вектор x с координатами x_1, x_2, \dots, x_n . Выберем новую систему координат из числа векторов, образующих подпространство L . Новые координаты вектора x выразятся через старые координаты с помощью преобразования вида:

$$x' = Ax, \quad (8)$$

где A - матрица с преобразованиями a_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, m$).

Матрица A является детерминированной, и её определитель не равен нулю $|A| \neq 0$.

Каждая составляющая x'_i вектора x' в новой системе координат вносит вклад в представление наблюдаемого вектора, а каждой матрице A соответствует определённый вектор x' .

Предположим, для определённости, что длина вектора x в исходной системе координат будет больше длины вектора x' в новой системе координат.

$$|x| > |x'|. \quad (9)$$

Будем измерять длины векторов x и x' соответственно с погрешностью δ и δ' . Тогда числа, характеризующие длину вектора в обеих системах координат, равны, соответственно:

$$t = |x| / \delta; \quad t' = |x'| / \delta'.$$

В обеих системах координат x и x' должно соблюдаться равенство $t = t'$. Следовательно $\delta > \delta'$, т.е. в первой системе координат для определения длины вектора можно пользоваться прибором с большей погрешностью, чем во второй. С этой точки зрения первая система координат предпочтительнее второй.

Теперь измерим расстояние между двумя соседними точками с одинаковой погрешностью δ в обеих системах координат. Условие (9) позволяет сделать заключение, что относительная погрешность измерения в первой системе координат будет меньше, чем во второй.

$$\lambda = \delta/|x| < \lambda' \quad (10)$$

Минимально различимое расстояние между двумя соседними точками характеризуется величиной

$$\Delta s = \lambda \cdot \delta.$$

Из равенства (10) следует, что $\Delta s < \Delta s'$.

Итак, первая система координат предпочтительнее, поскольку при одной и той же погрешности измерения можно различить большее число состояний: $N = |x| / \Delta s$.

Можно сказать, что при использовании приборов с одинаковой погрешностью первая система координат обладает большей разрешающей способностью.

Возьмём в качестве критерия для оценки эффективности системы координат квадрат расстояния между двумя бесконечно близкими точками подпространства L . При известных соотношениях (2), определяющих многообразие M , квадрат расстояния между двумя бесконечно близкими точками представляет собой квадратичную дифференциальную форму:

$$ds^2 = \sum \sum g_{ik} (x_1, x_2, \dots, x_n) dx_i dx_k, \quad (11)$$

где: x_1, x_2, \dots, x_n – координаты вектора x ; $g_{ik} (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – компоненты метрического тензора.

Для определения компонентов метрического тензора необходимо координаты n – мерного пространства $X (x_1, x_2, \dots, x_n)$ выразить через выбранные координаты m – мерного подпространства L , используя h соотношений (2). Функции f_1, f_2, \dots, f_h должны удовлетворять следующему требованию: любому набору чисел x_1, x_2, \dots, x_m должно отвечать одно значение функции f_i . Для этого функции f_1, f_2, \dots, f_h должны быть непрерывны и иметь непрерывные частные производные по всем переменным.

В общем случае функция f_1, f_2, \dots, f_h является нелинейной, поэтому компоненты метрического тензора находятся для окрестности одной точки в криволинейных координатах.

Выразим параметры x_1, x_2, \dots, x_n через координаты x_1, x_2, \dots, x_m , разрешив соотношения (2) относительно остальных $(n - m)$ неизвестных:

$$x_1 = x_1;$$

$$\begin{aligned} x_2 &= x_2; \dots \\ &\vdots \\ x_m &= x_m; \\ x_{m+1} &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_m); \quad (12) \\ x_{m+1} &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_m); \\ &\vdots \\ x_n &= f_h(x_1, x_2, \dots, x_m). \end{aligned}$$

При известных соотношениях (12) находим компоненты метрического тензора $g_{ik} (x_1, x_2, \dots, x_n)$ в общем виде [9].

Из выражений (11) и (12) следует, что значение компонент метрического тензора g_{ik} зависят только от физических свойств и геометрических форм контролируемого объекта, а также от системы координат, в которой происходит наблюдение за объектом. Поэтому они представляют собой известные и характерные для наблюдаемого явления величины в рамках определённой системы координат.

Одному и тому же контролируемому объекту в любой новой системе координат соответствуют характерные для неё компоненты метрического тензора. Отсюда следует, что каждой системе координат соответствует своя собственная, объективно существующая дифференциальная квадратичная форма, значение которой зависит только от уравнений (2), отражающих реальные физические свойства контролируемого явления. Использование этого свойства позволяет оценивать степень эффективности анализируемой системы координат и сравнивать между собой различные системы координат путём сопоставления соответствующих им дифференциальных квадратичных форм.

Таким образом, критерием для оценки эффективности системы координат, используемой для наблюдения определённого физического явления, может служить первая квадратичная дифференциальная форма (11). Меньшее значение квадратичной формы (11) соответствует большей разрешающей способности системы координат относительно анализируемого контролируемого объекта.

Выбор оптимальной системы координат для участка электрической сети

Физические процессы, происходящие на произвольном участке электрической цепи постоянного тока, характеризуются силой тока, напряжением, мощностью и сопротивлением. Если измерения проводятся для технологического контроля, можно считать сопротивление участка цепи постоянным. При диагностическом контроле, сопротивление – величина переменная. Указанные выше параметры характеризуются двумя известными уравнениями:

$$N = I \cdot U. \quad (13)$$

$$U = I \cdot R. \quad (14)$$

Пусть сопротивление электрической цепи будет постоянным. Тогда измерение можно производить в трёх системах координат:

- * напряжение – сила тока ($U - I$);
- * напряжение – мощность ($U - N$);

* мощность – сила тока ($N - I$).

Приведённые системы координат - двумерные. Произведём выбор оптимальной системы координат путём анализа собственных значений первой дифференциальной квадратичной формы без нахождения её условного минимума методом множителей Лагранжа.

Первая дифференциальная квадратичная форма для двумерной системы координат запишется так:

$$ds^2 = E \cdot dx_1^2 + 2dx_1dx_2 + G \cdot dx_2^2. \quad (15)$$

При получении дифференциальных квадратичных форм для анализа трёх систем координат следует переменные X_1 и X_2 заменить координатами соответствующей системы. Для нахождения компонент метрического тензора E, F, G необходимо из трёх величин I, U, N выделить параметры прямого измерения и косвенную величину, а также найти производные косвенной величины по каждому из параметров прямого измерения (табл. 1).

Таблица 1

Параметры прямого измерения, косвенные величины и производные косвенной величины

Параметры прямого измерения, x_1, x_2	Косвенная величина, y	dy/dx_1	dy/dx_2
I, U	N	$2 \cdot IR$	$2 \cdot U/R$
I, N	U	R	$1/2 \sqrt{(R/N)}$
U, N	I	$1/R$	$1/2 \sqrt{(R/N)}$

Компоненты метрического тензора для уравнения (15) во всех трёх системах координат приведены в табл. 2. Для облегчения анализа компоненты метрического тензора во всех системах координат выражены через две величины: мощность и сопротивление.

Таблица 2

Компоненты метрического тензора

Система координат	$E = g_{11}$	$2F - 2g_{12}$	$G = g_{22}$
$I - U$	$1 + 4NR$	$1N$	$1 + 4N/R$
$I - R$	$1 + R^2$	$R\sqrt{(R/N)}$	$1 + 4N/R$
$U - N$	$1 + 1/R^2$	$1/R \cdot 1/\sqrt{NR}$	$1 + 4N/R$

Сравнение соответствующих компонент метрического тензора не позволяет сделать вывод о наилучшей системе координат, поэтому приведём первую дифференциальную квадратичную форму к каноническому виду:

$$ds^2 = \lambda_1 \cdot (dx_1')^2 + \lambda_2 \cdot (dx_2')^2, \quad (16)$$

где: λ_1, λ_2 – соответствующие значения квадратичной формы; x_1', x_2' – координаты некоторого нового пространства, в котором квадратичная форма имеет канонический вид.

Собственные значения квадратичной формы находятся из выражения (17).

$$\lambda_{1,2} = (E + G \pm \sqrt{(E + G)^2 - 4(EG - F^2)})/2. \quad (17)$$

Для анализируемых координат собственные значения квадратичной формы приведены в табл. 3. Положение координат x_1', x_2' характеризуется углом поворота относительно начальной системы

координат. Значение угла поворота находится по формуле:

$$tg\alpha = (\lambda_{min} - E)/F. \quad (18)$$

Угол α характеризует положение квадратичной формы в пространстве dx_1, dx_2 , т.е. отражает поворот главного направления квадратичной формы, соответствующий минимальному собственному значению относительно координаты dx_1 . Для анализируемых систем координат значения тангенсов углов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Собственные значения квадратичной формы

Система координат	λ_1	λ_2	$tg\alpha$	Условия оптимальности
$I - U$	1	$1 + 4 \cdot NR + 4 \cdot N/R$	$-R$	$R/(4N) > 1; 1/(4RN) > 1$
$I - N$	1	$(1 + 4NR + 4N/R) \cdot R/4N$	$-\sqrt{RN}$	$R/4N < 1/4RN; R/4N < 1$
$U - N$	1	$(1 + 4NR + 4N/R) \cdot 1/4RN$	$-\sqrt{(N/R)}$	$1/(4RN) < 1; 1/(4RN) < R/(4N)$

Сравним системы координат по собственным значениям первой дифференциальной квадратичной формы. Одно собственное значение для всех трёх случаев равно единице. Поэтому оптимальной системой координат является та, для которой второе собственное значение λ_2 - наименьшее, то есть первая дифференциальная квадратичная форма.

Величина второго собственного значения зависит от потребляемой мощности и сопротивления электрической цепи. Следовательно, любая из рассмотренных систем координат может быть оптимальной (см. «Условия оптимальности» табл.3) при определённых соотношениях параметров электрической цепи.

Для участка электрической цепи постоянного тока наиболее эффективной для наблюдения системой координат является та, для которой выполняется условие оптимальности. Это значит, что оптимальная система координат имеет максимальную разрешающую способность для наблюдения за физическим явлением (уравнения (13) и (14)).

Обычно применяемые для измерения величины - напряжение и сила тока - эффективны только при незначительных мощностях, потребляемых электрической цепью постоянного тока. Чем дальше от границы разделяющей области отстоит точка, характеризующая параметры цепи, тем больше эффект от использования оптимальной системы координат, т.е. тем выше её разрешающая способность.

Выбор оптимальной системы координат по собственным значениям первой дифференциальной квадратичной формы позволяет выделить наилучшие параметры для измерения, причём в некоторых случаях, это можно сделать даже в общем виде, без проведения расчётов.

Заключение

1. Между параметрами, характеризующими техническое состояние и функционирование объектов инфраструктуры, устанавливаются соотношения, которые выражают в виде

математических зависимостей реальные физические связи.

2. При комбинировании исключаемых величин правило преобразования координат позволяет определить несколько групп независимых между собой векторов, называемых базисными, каждый из которых порождает некоторое подпространство, а количество независимых параметров, которые должны быть выбраны и измерены для решения системы уравнений, определяются разностью общего количества всех переменных в уравнениях и числом этих уравнений.

3. Критериями выбора координатной системы являются возможность технической реализации измерения параметров и достаточная точность получаемых результатов. Эти критерии существенно уменьшают количество всевозможных базисов, однако часто их число все ещё остаётся больше единицы, поэтому проблема выбора координат сохраняется.

4. Основной задачей сравнительного анализа является выявление существования такой системы координат из числа реально существующих, в которой физическая сущность контролируемого явления проявляется наилучшим образом.

5. Каждой системе координат соответствует своя собственная объективно существующая дифференциальная квадратичная форма, отражающая реальные физические свойства контролируемого явления. Использование этого свойства позволяет оценивать эффективность анализируемой системы координат и сравнивать между собой различные координатные системы, сопоставляя соответствующие дифференциальные квадратичные формы.

6. Критерием оценки эффективности системы координат, используемой для наблюдения определённого физического явления, может служить первая квадратичная дифференциальная форма. Меньшее значение квадратичной формы соответствует большей разрешающей способности системы координат относительно контролируемого объекта.

7. Выбор оптимальной системы координат по собственным значениям первой дифференциальной квадратичной формы подтверждает выделение наилучших для измерения параметров, причём, в некоторых случаях, это можно осуществить даже в общем виде, не производя никаких расчётов.

Литература

1. Бордученко Ю. Л., Малыгин И. Г., Каминский В. Ю., Аксенов 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.
2. Стариченков А. Л., Скороходов Д. А., Каминский В. Ю., Хабаров С. П. Структура программного обеспечения системы интеллектуальной поддержки принятия решения экипажем судна // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 2-1(60). С. 128-135.
3. 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.
4. Александров П.С. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры: учебник, 2 изд. СПб., изд. «Лань», 2009, 512 с.
5. Мальцев А.И. Основы линейной алгебры. М., изд «Наука», 1975, 400 с.
6. Вулих Б.З. Введение в функциональный анализ, 2 изд. М., изд. «Наука», 1967, 416 с.
7. Ахметзянов А.М., Дубровский Н.Г., Тунаков А.П. Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам. М., изд. «Машиностроение», 1983, 206 с.
8. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М., изд. «Наука», 1966, 576 с.
9. Ефимов Н.В. Квадратичные формы и матрицы. М., изд. «Наука», 1967, 161 с.

References

1. Borduchenko YU. L., Malygin I. G., Kaminsky V. Yu., Aksenov 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]. // Morskije intellektual'nye tekhnologii. 2021. № 2-1(52). pp. 14-25.
2. Starichenkov A. L., Skorohodov D. A., Kaminsky V. Yu., Habarov S. P. Struktura programmnogo obespecheniya sistemy intellektual'noj podderzhki prinyatiya resheniya ekipazhem sudna [The structure of the software of the intelligent decision support system by the ship's crew]. // Morskije intellektual'nye tekhnologii. 2023. № 2-1(60). pp. 128-135.
3. Gurlev I. V., Makosko A. A., Malygin I. G., Kaminsky V. Yu. Intellektualizaciya transportnoj sistemy Severnogo morskogo puti [Intellectualization of the Northern Sea Route transport system]. // Morskije intellektual'nye tekhnologii. 2021. № 3-1(53). pp. 228-235.
4. Aleksandrov P.S. Kurs analiticheskoj geometrii i linejnoj algebrы [Analytical Geometry and Linear Algebra course]: uchebник, 2 izd. SPb., izd. «Lan'», 2009, 512 p.
5. Mal'cev A.I. Osnovy linejnoj algebrы [Basics of linear Algebra]. M., izd «Nauka», 1975, 400 p.
6. Vulih B.Z. Vvedenie v funkcional'nyj analiz [Introduction to Functional Analysis], 2 izd. M., izd. «Nauka», 1967, 416 p.
7. Ahmetzyanov A.M., Dubrovskij N.G., Tunakov A.P. Diagnostika sostoyaniya VRD po termogazodinamicheskim parametram [Diagnostics of the VRD state by thermogasodynamic parameters]. M., izd. «Mashinostroenie», 1983, 206 p.
8. Gantmaher F.R. Teoriya matric [Matrix theory]. M., izd. «Nauka», 1966, 576 p.
9. Efimov N.V. Kvadratichnye formy i matricy [Quadratic forms and matrices]. M., izd. «Nauka», 1967, 161 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

Валерий Юрьевич Каминский, 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

Дмитрий Алексеевич Скороходов, 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

Виктор Тихонович Васьков, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: uprds@gov.spb.ru

Valery Yu. Kaminsky, senior lecturer, 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

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

Viktor V. Vaskov, senior lecturer, PhD (Eng), senior researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: uprds@gov.spb.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.07.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 12.08.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 15.08.2023

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Научная статья

УДК 614.845.1

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.017>

Анализ нормативных требований к огнетушителям, размещаемым на судах

Д.Ф. Кожевин¹ yagmort_kdf@mail.ru, А.А. Таранцев^{1,2} nfo@iptran.ru,
В.Г. Естехин¹ estekhin@inbox.ru, И.Н. Коновалов² simulator.ipt@outlook.com

¹Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России

²Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН,

Аннотация. Пожары на судах представляют большую опасность как для самого судна, так и для экологии акватории и порта, ввиду чего оперативное тушение пожара на судне является актуальной задачей. Данная статья посвящается рассмотрению фактической ситуации нормирования требований по размещению и массе заряда размещаемых на судах огнетушителях. Проведен сравнительный анализ международных и отечественных нормативных документов, регламентирующих оснащение судов первичными средствами пожаротушения. Основное внимание акцентируется на влиянии массы огнетушащих веществ первичных средств пожаротушения на количество пожаров на морских судах. В статье произведен расчет среднего значения требуемой массы огнетушащих веществ и количества защищаемых помещений на Российских и иностранных судах. Анализ статистики пожаров за последние 10 лет на морском транспорте подтверждает корреляцию количества пожаров от величины средней массы огнетушащих веществ. Количество пожаров на отечественных морских судах значительно ниже (в 9,6 раз), чем на зарубежных. Это подтверждается более строгими и конкретными требованиями Российских нормативных документов, регламентирующих оснащение судовых помещений первичными средствами пожаротушения. На основании анализа пожаров на морских судах и документов, регламентирующих оснащение первичных средств пожаротушения определена эффективность методики оснащения судов огнетушителями.

Ключевые слова: пожары на морских (речных) судах, первичные средства (огнетушители) пожаротушения на судах.

Для цитирования: Кожевин Д.Ф., Таранцев А.А., Естехин В.Г., Коновалов И.Н. Анализ нормативных требований к огнетушителям, размещаемым на судах // Морские интеллектуальные технологии, 2023. № 3 часть 1, С. 170—178. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.017

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.017>

Analysis of regulatory requirements for fire extinguishers placed on ships

Dmitry F. Kozhevina¹ yagmort_kdf@mail.ru, Alexander A. Tarantsev^{1,2} nfo@iptran.ru,
Vitalii G. Estekhin¹ estekhin@inbox.ru, Ivan N. Konovalov² simulator.ipt@outlook.com

¹St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia

²Solomenko Institute of Transport Problems of RAS

Abstract. Fires on ships pose a great danger both for the ship itself and for the ecology of the water area and sports, which is why the prompt extinguishing of a fire on a ship is an urgent task. This paper is devoted to the assessment of the actual situation of standardization of requirements on placement and mass of charge of the fire extinguishers placed on vessels. A comparative analysis of domestic and international regulatory documents regulating the equipping of vessels with primary fire extinguishing equipment was carried out. The main attention is focused on the influence of the mass of fire extinguishing agents of primary fire extinguishing agents on the number of fires on sea vessels. The average value of the required mass of fire extinguishing agents and the number of protected premises on Russian and foreign vessels has been calculated in the paper. The analysis of fire statistics on maritime transport over the past 10 years confirms the correlation between the number of fires and the average mass of fire extinguishing agents. The number of fires on domestic sea vessels is significantly lower (9.6 times) than on foreign ships, this is confirmed by more strict and specific requirements of Russian regulatory documents regulating the equipping of the shipboard spaces with primary fire extinguishing equipment. Based on the analysis of fires on sea vessels and documents regulating the equipping by primary fire extinguishing equipment, there was determined the effectiveness of the method of equipping the vessels by primary fire extinguishing equipment.

Key words: fires on sea (river) vessels, primary fire fighting equipment (fire extinguishers) on ships.

For citation: Kozhevina D.F., Tarantsev A.A., Estekhin V.G., Konovalov I.N. Analysis of regulatory requirements for fire extinguishers placed on ships // Marine intellectual technologies, 2023. № 3 part 1, P. 170—178. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.017

Введение

В статье [1] рассмотрены значения требуемой вероятности эффективного действия огнетушителей, обеспечивающего, в сочетании с другими способами (ст. 52 [16]), пожарную безопасность судна. Обоснована формула определения эффективности первичных средств пожаротушения (ПСП), составляющей которой является действенность (эффективность) методики оснащения судов огнетушителями:

$$P_{\text{перв}} = P_{\text{констр}} \cdot P_{\text{ОТВ}} \cdot P_{\text{осн}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{констр}}$ - эффективность конструкции; $P_{\text{ОТВ}}$ - эффективность огнетушащего состава; $P_{\text{осн}}$ - эффективность методики оснащения (с учетом того, что эффективность пожаротушения зависит от оснащения судна ПСП) ими объектов.

Определение эффективности методики оснащения ПСП на судах возможно выразить следующим образом:

$$P_{\text{осн}} = P_{\text{треб.ОТВ}} \cdot P_{\text{дост.}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{треб.ОТВ}}$ - потенциальная результативность огнетушащих веществ (ОТВ) - масса заряда размещенных на судне огнетушителей; $P_{\text{дост.}}$ - вероятность доставки ОТВ к очагу пожара (размещение огнетушителей на судне).

В свою очередь, потенциальная результативность ОТВ выражается через функцию:

$$P_{\text{треб.ОТВ}} = f(m_{\text{норм.ОТВ}}), \quad (3)$$

где $m_{\text{норм.ОТВ}}$ - среднее значение требуемой массы ОТВ ПСП, расположенных на судне (или доля массы ОТВ указанная в табл. 1,2 и рис.1).

Вероятность доставки ОТВ к очагу пожара зависит от количества защищаемых судовых помещений ПСП и определяется:

$$P_{\text{дост.}} = f(n_{\text{норм.пом.}}), \quad (4)$$

где $n_{\text{норм.пом}}$ - среднее количество защищаемых помещений (отображено в табл. 1,2 и рис.1), оснащенных ПСП.

Параметры $m_{\text{норм.ОТВ}}$ и $n_{\text{норм.пом}}$ определяется действующими нормативно-правовыми актами [2-4], регламентирующими оснащение судов ПСП и представленных в табл.1. Данная статья посвящена рассмотрению фактической ситуации нормирования требований по размещению и массе заряда, размещаемых на судах огнетушителей.

Сравнительный анализ

В статье были проанализированы основные руководящие документы, регламентирующие пожарную безопасность и оснащение ПСП на судах [2-8].

Требования к оснащению кораблей любого назначения и тоннажа ПСП приведены в:

- Российском Морском Регистре Судоходства (PMPC);
- Российском Классификационном Обществе (PKO);
- Международной Конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 года SOLAS 74 (далее – SOLAS).

В табл.1 приведен сравнительный анализ требований основных нормативных документов к оснащению судов ПСП.

Отечественные судоходные компании руководствуются правилами PMPC и PKO в области пожарной безопасности и оснащения ПСП, тогда как иностранные компании используют правила SOLAS.

Анализ данных, приведенных в табл.1, подтверждает, что PMPC требует от отечественных морских судоходных компаний большего количества ОТВ в судовых помещениях (общая масса - 494 кг), тогда как SOLAS требует 386 кг, из которых 198 кг в машинно-котельном отделении (МКО), что составляет 51% от общей требуемой массы ОТВ, и лишь 3 % (12 кг) приходится на грузовые помещения. В PMPC процентное соотношение составляет 41% (204 кг) от общей массы в МКО и 21% (104 кг) в жилых и служебных помещениях.

PMPC предъявляет более строгие и конкретные требования в отношении противопожарной защиты судов, а также исключает такое понятие, как «оснащение средствами пожаротушения в достаточном количестве на усмотрение Администрации» в отличие от SOLAS. Вместо этого предъявляются конкретные требования к помещениям по виду огнетушащего вещества, массе заряда, их количеству, месту расположения и даже расстоянию относительно объекта и площади помещений. Также количество защищаемых судовых помещений ПСП больше, чем в SOLAS и PKO (из 14 помещений требования предъявляются к 12, охват составляет 86%), тогда как в SOLAS охват составляет 57% (8 помещений из 14). Наиболее лояльными являются требования PKO, регламентирующие правила пожарной безопасности внутренних и смешанных (река-море) плавания судов [9]. Несмотря на то, что охват судовых помещений ПСП больше, чем в SOLAS, и составляет 64% (9 помещений), общая масса ОТВ - 113 кг. PKO по общей массе ОТВ уступает SOLAS в 3,4 раза и PMPC - в 4,4 раза. PKO требует 22 кг ОТВ в МКО, что составляет 19% от общей массы, что в 9 раз меньше чем в PMPC и SOLAS

Требования PKO также не охватывают такие категории помещений, как жилые, служебные и грузовые помещения, в которых наиболее вероятно возникновение пожара. В свою очередь, SOLAS не охватывает такие категории судовых помещений, как жилые, служебные помещения и помещения, в которых находятся электрические машины. PMPC не охватывает грузовые помещения, в которых также наиболее вероятно возникновения пожара на судне [10]. Исходя из данных, представленных в табл.1, отсутствует единый нормативный документ, который бы охватывал все категории судовых помещений в области пожарной безопасности.

Требования по оснащению судов ПСП (по их усредненной массе) различными нормативными документами [2-4] приведены на рис.1.

Абсолютные значения по массе ОТВ в огнетушителях для различных помещений на судах приведены в табл.2.

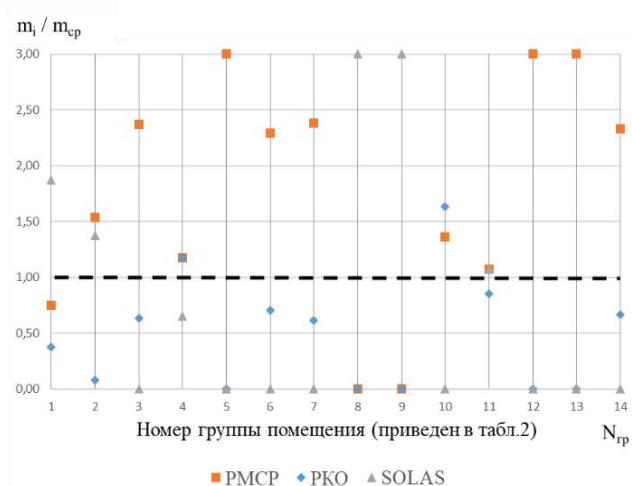


Рис. 9 Распределение приведенной (по среднему значению) массы ОТВ по группам помещений в соответствии с НПА

Таблица 1

Требования, предъявляемые к первичным средствам пожаротушения по количеству и местам размещения на судах [2,3,4]

Российские нормативные документы		Зарубежные нормативные документы	m _{норм. ОТВ} (среднее значение требуемой массы ОТВ, кг)
РМР (морские суда)	РКО (суда внутреннего и смешанного «река-море» плавания)	SOLAS 74 Международная Конвенция по охране человеческой жизни на море 1974.	
Машинные помещения с двигателями внутреннего сгорания			
ОВП-9, 2 шт. на расстоянии не более 10 м.	ОВП-9 или ОП-4, 2 шт.; ОВП-9 или ОП-4, 1 шт. на судах с двигателем мощностью до 110 кВт. ОП-4 или ОУ-3, 1 шт., если находится электрощитовая в машинном помещении.	ОВП-45, 1 шт. ОВП-9, на усмотрение администрации, но не менее 2 шт. на расстоянии не более 10 м. На грузовых судах Администрация может смягчить это требование для помещений небольшого размера.	24
Машинные помещения с котлами, работающими на жидком топливе			
ОВП-9, 2 шт. ОВП-135 (может заменяться ОУ-45 или ОП-45) 1 шт. Дополнительно ОВП-9, 2 шт., если имеются установки жидкого топлива.	ОВП-9 или ОП-4, 1 шт. на каждый котел.	ОВП-9, не менее 2 шт. ОВП-135, не менее 1 шт. Ящик с песком или переносной огнетушитель одобренного типа.	111
В помещениях, в которых располагаются электрические машины или механизмы			
Суммарная мощность главных механизмов менее 740 кВт: ОУ-5, 1 шт. Суммарная мощность главных механизмов равна или более 740 кВт: ОУ-5, 2 шт. Электрический генератор мощностью 500-1000 кВт: ОУ-5, 1 шт. На каждое помещение или группу (не более трех) имеющие механизмы электроприводов: ОУ-5, 1 шт. Суммарная мощность главных механизмов 5000 кВт и более: ОВП-135 (может заменяться ОУ-45 или ОП-45) 1 шт.	ОП-4 или ОУ-3, 1 шт. электрический генератор мощностью более 200 кВт.	Если, по мнению Администрации, существует опасность пожара в любом из машинных помещений, для которых нет специфичных положений в отношении противопожарных средств, в этом помещении, или в смежном с ним, обеспечивается такое количество одобренных переносных огнетушителей или иных средств пожаротушения, какое Администрация сочтет достаточным.	6,3
Помещения, в которых находятся воспламеняющиеся жидкости			
ОВП-9, 1 шт. на каждое помещение. Если помещение менее 50 м ² ОВП устанавливается у входа в помещение или группу небольших по площади	ОВП-9 или ОП-4, 1 шт. на каждое помещение.	ОУ-5, 1 шт. в кладовых с площадью палубы менее 4 м ² не имеющих доступа в жилые помещения.	7,6

Российские нормативные документы		Зарубежные нормативные документы	<i>m_{норм. ОТВ}</i> (среднее значение требуемой массы ОТВ, кг)
РМР (морские суда)	РКО (суда внутреннего и смешанного «река-море» плавания)	SOLAS 74 Международная Конвенция по охране человеческой жизни на море 1974.	
помещений (суммарной площадью не более 50 м ²).		Альтернативно, может использоваться пожарный кран для подачи огнетушащих веществ.	
Жилые и служебные помещения			
ОВП-9, 1 шт. на каждые 25 м длины коридоров; ОВП-9, 1 шт. на каждые 250 м ² площади помещений; ОВП-9 или ОУ-5, 1 шт. в камбузах и пекарнях; ОП-5, 1 шт. в лазарете; ОВП-9, 1 шт. в прочих служебных помещениях (у входа в коридоре или внутри помещения).	Информация отсутствует.	Должны обеспечиваться переносными огнетушителями соответствующих типов и в достаточном, на усмотрение Администрации, количестве. Не менее пяти переносных огнетушителей на судах валовой вместимостью 1000 и более. ОУ не должны размещаться в жилых помещениях.	34,6
Посты управления			
ОВП-9, 1 шт. на каждое помещение или на группу небольших помещений суммарной площадью до 50 м ² ; ОВП-9, 1 шт. в помещении, где расположен аварийный дизель-генератор или пожарный дизель-насос; ОУ-5, 1 шт. на каждое помещение или группу помещений, где имеется электро- или радиооборудование, а также в хранилищах карт; ОП-5, 2 шт. на помещение рулевой рубки, если площадь рулевой рубки менее 50 м ² , то требуется только 1 огнетушитель. 1 дополнительный ОУ-5, когда главные распределительные щиты размещены в центральном посту управления главными и вспомогательными механизмами.	ОП-4 или ОУ-3, 1 шт. на каждое помещение.	На постах управления предъявляются такие же требования, что и к жилым и служебным помещениям. На постах управления и иных помещениях, содержащих электрическое или электронное оборудование, или средства, необходимые для безопасности судна, огнетушители заряжаются огнетушащим веществом, которое не является электропроводным и не наносит вреда оборудованию и средствам.	22,3
Отдельные помещения, содержащих электрораспределительные щиты			
ОУ-5, 2 шт. на помещение. ОУ-5, 1 шт. у входа в помещение площадью менее 15 м ² ; ОУ-16 или ОП-16, 1 шт., если длина щита более 5 м и помещение не защищается системой объемного пожаротушения.	ОП-4 или ОУ-3, 2 шт. на помещение	Информация отсутствует.	7,6
Вертолетная палуба			
Информация отсутствует.	Информация отсутствует.	ОП-45, 2 шт. и ОУ-18, 2 шт. в непосредственной близости к вертолетной палубе.	42
Грузовые помещения			
Информация отсутствует.	Информация отсутствует.	ОП-12 или равноценный ему в грузовых помещениях. Эти огнетушители предусматриваются в дополнение к любым другим переносным огнетушителям.	4
Грузовые насосные помещения и станции раздачи топлива			
ОП-5, 2 шт. в помещении грузовых насосов; ОП-5, 1 шт. в иных насосных помещениях, станциях раздачи топлива, шахтах бензопроводов, шланговых помещениях на каждые 30 м ² площади пола помещения.	ОВП-9 или ОП-4, 1 шт. на помещение.	Информация отсутствует	11
В помещениях специальной категории и в грузовых помещениях для автотранспорта с топливом в баках			
ОВП-9, 1 шт. все палубы на каждые 20 м длины с каждого борта.	ОВП-9 или ОП-4, 1 шт. все палубы на	ОВП-9, 1 шт. все палубы на каждые 20 м длины с каждого борта.	36

Российские нормативные документы		Зарубежные нормативные документы		m _{норм. ОТВ} (среднее значение требуемой массы ОТВ, кг)
РМР (морские суда)	РКО (суда внутреннего и смешанного «река-море» плавания)	SOLAS 74 Международная Конвенция по охране человеческой жизни на море 1974.		
ОВП-9, 1 шт. у въезда и входа в эти помещения из жилых и машинных помещений.	каждые 20 м длины с каждого борта.	По меньшей мере один переносной огнетушитель должен располагаться у каждого доступа в такое грузовое помещение.		
Производственные помещения				
ОП-5, 2 шт. при площади помещений до 100 м ² ; ОП-5, 1 шт. на каждые 250 м ² , площади помещений сверх 100 м ² .	Информация отсутствует.	Информация отсутствует.		3,3
Помещения сварочной мастерской				
ОП-5 и ОУ-5, 1 шт. на каждое помещение.	Информация отсутствует.	Информация отсутствует.		1,6
Камбуз				
ОП-5, 1 шт. на каждое помещение камбуза, работающего на жидком топливе; 1 доп. огнетушитель, пригодный для тушения кухонного топленого сала, жиров и масла для камбузов с фритюрницами; ОП-5 или ОУ-5, 1 шт., если камбуз площадью более 50 м ² .	ОП-4 или ОУ-3, 1 шт. на помещение камбуза, работающего на электричестве; ОВП-9 или ОП-4, 1 шт. на помещение камбуза, работающего на жидком топливе.	Информация отсутствует.		8

Примечания: ОВП – огнетушитель воздушно-пенный, ОП – огнетушитель порошковый, ОУ – огнетушитель углекислотный

Таблица 2

Результаты расчета значений (среднее, приведенное) на основе данных по массе ОТВ

группа помещений	Вид помещения	Масса ОТВ по нормативным документам, кг			Средняя масса ОТВ, кг	Приведенная (по среднему значению) масса ОТВ по нормативным документам		
		РМРС	РКО	SOLAS		РМРС	РКО	SOLAS
1	МКО с ДВС	18	9	45	24,00	0,75	0,38	1,88
2	МКО с котлами, работающими на жидком топливе	171	9	153	111,00	1,54	0,08	1,38
3	Помещения с электрическими машинами	15	4	0	6,33	2,37	0,63	0,00
4	Помещения с воспламеняющимися жидкостями	9	9	5	7,66	1,17	1,17	0,65
5	Жилые и служебные помещения	104	0	0	34,66	3,00	0,00	0,00
6	Посты управления	52	16	0	22,66	2,29	0,71	0,00
7	Помещения с электрораспределительными щитами	31	8	0	13,00	2,38	0,62	0,00
8	Вертолетная палуба	0	0	126	42,00	0,00	0,00	3,00
9	Грузовые помещения	0	0	12	4,00	0,00	0,00	3,00
10	Грузовые насосные помещения	15	18	0	11,00	1,36	1,64	0,00
11	Помещения для автотранспорта с топливом в баках	45	36	45	42,00	1,07	0,86	1,07

группа помещений	Вид помещения	Масса ОТВ по нормативным документам, кг			Средняя масса ОТВ, кг	Приведенная (по среднему значению) масса ОТВ по нормативным документам		
		PMPC	PKO	SOLAS		PMPC	PKO	SOLAS
12	Производственные помещения	10	0	0	3,33	3,00	0,00	0,00
13	Помещения сварочной мастерской	10	0	0	3,33	3,00	0,00	0,00
14	Камбуз	14	4	0	6,00	2,33	0,67	0,00

Помимо огнетушителей суда должны оснащаться пожарными кранами (ПК) и другими ПСП. Одним из основных требований к оснащению судов ПК в отечественных нормативных документах (PMPC, PKO) является требование о том, чтобы минимум две струи воды от ПК, пресекались в любой части судна. Категория защищаемых помещений в обоих документах это МКО. Единственное отличие заключается в том, что PMPC предъявляет требования к туннелям гребного вала, а PKO требует наличие ПК в помещениях с технологическим оборудованием и отделениях холодильных машин.

Оснащение отечественных судов пожарными покрывалами и комплектами пожарного инструмента принципиально отличаются, т.к. PMPC оснащает свои суда, исходя из валовой вместимости судна, а PKO - из длины судна. В свою очередь, SOLAS не отображает требования к местам размещения и количеству ПК, покрывал и инструмента на иностранных судах.

Эффективность использования ПСП может быть определена, только из анализа их применения или статистики пожаров на объектах, на которых они применяются.

Из анализа данных последних 25 лет, касающихся пожаров на судах, следует, что максимальная продолжительность тушения пожаров в жилых и служебных помещениях составляет приблизительно 15 часов, МКО – 56 часов, грузовые помещения – 290 часов. Размеры судовых помещений, пожарная нагрузка, способы вентиляции и способы подачи ОТВ влияют на продолжительность тушения пожаров. При своевременном применении ПСП и оперативном начале тушения пожара продолжительность тушения может сократиться: для жилых помещений – 6 часов, МКО – 7 часов, грузовые помещения – 90 часов [10].

Для сравнительной оценки действенности нормативно-правовых актов в области пожарной безопасности в части применения ПСП был проведен анализ данных о пожарах на судах России (PMPC и PKO), Японии (SOLAS), Канады (SOLAS).

За отчетный период с 2011 по 2021 год на отечественном транспорте было зафиксировано 777 аварий и 42 пожара в которых погибло 467 человек и 84 было травмировано. В среднем за год происходит 77 аварий и гибнет 44 моряка [11].

По данным Японского совета по безопасности на транспорте, за отчетный период с 2011 по 2021 года на морском транспорте произошло 7 607 аварийных

случаев и 368 пожаров, в которых погибло 1 597 человек [12].

Транспортный Совет Безопасности Канады также опубликовал статистические данные за прошедшие 10 лет. Общее число аварий, зафиксированных на их морском транспорте, составляет 2 872 случая, из них 402 пожара, в которых погибло 167 человек и 523 человека получили тяжелые травмы. Также в 2021 году зафиксирован существенный рост пожаров на морском транспорте, который на 23% выше среднестатистического за прошедшие 10 лет [13].

В Канаде, как и в Японии судоходные компании руководствуются правилами SOLAS в области пожарной безопасности и оснащения первичными средствами пожаротушения.

Коэффициент корреляции количества пожаров от величины средней массы ОТВ на судне составляет $R^2 = 0,99268$, что показывает сильное влияние средней массы заряда в огнетушителе на количество пожаров на судне.

Из приведенных на рис. 2 статистических данных следует, что в России количество пожаров на морском транспорте за 10 лет ниже, чем в Канаде в 9,6 раз и Японии – в 8,8 раза. PMPC требует от Российских судоходных компаний большего количества огнетушителей в отличие от SOLAS, который регламентирует оснащения ПСП в Канаде и Японии. Требуемая масса ОТВ в PMPC на 108 кг больше, чем в SOLAS, что в процентном соотношении выше на 22%.

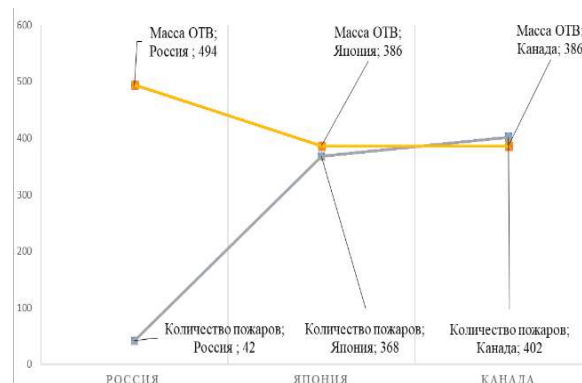


Рис. 10 Статистические данные о количестве пожаров и требуемой массе ОТВ в России, Канаде и Японии на морских судах

Зависимость количества пожаров на судах от количества защищаемых ПСП помещений также, как и от массы ОТВ близка к 1.

Из приведенных на рис. 3 статистических данных следует, что в России (РМРС) количество защищаемых судовых помещений ($n_{норм.пом}$) составляет 12 из 14 (охват 86% всех помещений), в свою очередь в Японии и Канаде (SOLAS) предъявляет требования к 8 из 14 помещений (охват составляет 57%).

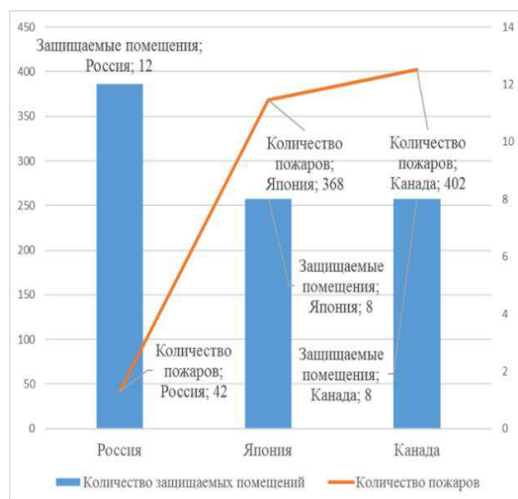


Рис. 11 Данные о количестве защищаемых помещений ПСП и пожарах в России, Канаде и Японии на морских судах

Выводы

Анализ требований нормативных документов, регламентирующих оснащение судов ПСП и соотношение количественных показателей этих требований со статистикой о пожарах на судах, показывает высокую корреляцию этих величин.

Из данных представленных в табл. 1,2 и рис. 1-3, следует, что РМРС, регламентирующий оснащение ПСП на морских судах в Российской Федерации, предъявляет гораздо более строгие и категоричные требования, чем SOLAS:

- это выражается в количестве защищаемых помещений ($n_{норм.пом}$), которое на 29% выше, чем в SOLAS;
- РМРС предъявляет более конкретные требования к помещениям по виду ОТВ, массе заряда ($m_{норм.ОТВ}$), их количеству, месту расположения и даже расстоянию относительно объекта и площади помещений, исключая оснащение ПСП на усмотрение Администрации объекта (SOLAS).

Утверждать, что количество защищаемых помещений ($n_{норм.пом}$) напрямую влияет на массу ОТВ ($m_{норм.ОТВ}$), неверно, поскольку РКО предъявляет требования к 9 судовым помещениям (охват составляет 64%), а SOLAS охватывает 57 % (8 помещений), тем не менее разница составляет 273 кг (29%) в пользу иностранного нормативного документа.

Несмотря на тот факт, что в РМРС охват судовых помещений ($n_{норм.пом}$) составляет 86%, требования не предъявляются к такой категории, как грузовые помещения, в которых продолжительность пожара может составлять от 90 до 290 часов [10].

Из приведенных данных, представленных в табл. 1 и 2 по формулам (2-4) определена эффективность методики оснащения ПСП на судах - табл.3.

Таблица 3

Приведенные значения показателей, выражающих эффективность методики оснащения ПСП на судах

НПА	$P_{дост}$	$P_{треб. ОТВ}$	$P_{осн}$
SOLAS	0,57	0,78	0,44
РМРС	0,86	1,73	1,49
РКО	0,64	0,48	0,31

Хотя из приведенных данных следует, что количество пожаров на судах, оснащаемых ПСП в соответствии с РМРС (т.е. Российских судах) гораздо ниже, чем в ряде стран, оснащаемых ПСП по SOLAS, абсолютное значение, количества пожаров на отечественных судах и количество погибших при этих пожарах [1] остается достаточно высоким, а, следовательно, проработка методики оснащения судов ПСП требует кардинальной, обоснованной доработки.

Эффективность $P_{осн}$ в данном случае определена не в абсолютных, а в относительных величинах, поэтому не может претендовать на «истину», но этот пример показывает возможность применения такого подхода, как инструмента определения эффективности методики оснащения судов огнетушителями.

В России отдельно не освещаются данные о пожарах на внутренних и смешанных (река-море) плаваниях судах. Учитывая тот факт, что с 2015 года наблюдается уверенный рост поставок судов данного класса [14], а к 2035 году запланировано строительство более 1500 судов класса «река-море» то данный класс судов является самым многочисленным в России [15].

Данные, представленные в табл.1-3 и рис.1, указывают на то, что РКО предъявляет более лояльные требования в области пожарной безопасности судов внутреннего плавания, чем РМРС и SOLAS. РКО не регламентирует оснащение ПСП в жилых, служебных и грузовых помещениях.

Отдельного внимания заслуживают три вопроса не рассмотренных в настоящей статье, но решаемых в рамках исследования:

- применение огнетушителей на паромов, перевозящих автомобили [17, 18];
- экологические аспекты тушения пожаров на судах с использованием огнетушителей;
- учет наличия стационарных систем пожаротушения и действия пожарной команды по тушению стволами.

Рекомендации по внедрению

Таким образом, из вышеизложенного следует, что для повышения пожарной безопасности судов необходимо разработать методику оснащения судов ПСП с учётом следующих требований:

- методика должна быть применима для всех видов и районов плавания судов (морские, речные, смешанного плавания, балкеры, пассажирские и т.д.);
- методика должна базироваться на определении вероятности доставки ОТВ к очагу пожара (размещение огнетушителей на судне) и потенциальной результативности ОТВ (масса заряда размещенных на судне огнетушителей).

Литература

1. Кожевин Д.Ф., Естехин В.Г. Оценка эффективности применения огнетушителей на водном транспорте // Проблемы управления рисками в техносфере. 2022. № 4 (64). С. 8–20.
2. Российский Морской Регистр Судоходства «Правила классификации и постройки морских судов, часть VI противопожарная защита»
3. Российское Классификационное Общество «Правила классификации и постройки судов, часть III Противопожарная защита». URL: <https://rfclass.ru>
4. Международная Конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года SOLAS 74. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901765675>
5. Постановление Минтранса РФ от 31.10.2003 № 10 «О Правилах пожарной безопасности на морских судах». URL: <https://docs.cntd.ru/document/456065965>
6. Постановление Минтранса РФ от 12.02.2004 № 12 «О правилах пожарной безопасности при проведении огневых работ на судах, находящихся у причалов морских портов и судоремонтных предприятий». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200036554/titles>
7. Приказ ФТС РФ от 25.08.2008 №1042 «Об утверждении Наставления по борьбе за живучесть морских и речных судов таможенных органов Российской Федерации». URL: <https://docs.cntd.ru/document/902116699>
8. Международный кодекс по системам пожарной безопасности, принятый резолюцией MSC.98(73). URL: <https://docs.cntd.ru/document/499032093>
9. Кодекс внутреннего водного транспорта Российской Федерации от 07.03.2001 № 24-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_30650
10. Шарапов С.В., Крутолапов А.С., Копейкин Н.Н. Анализ информации о пожарах на судах и о практике их тушения в портах // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 1. С. 52–60.
11. Анализ аварийности на судах отечественного флота: состояние, причины, тенденции, необходимые меры. А.Л. Боран-Кешишьян, А.Н. Томилин, Р.Р. Туктаров.
12. Japan Transport Safety Board, Number of Marine Accidents by Year as of October 31, 2022. URL: https://www.mlit.go.jp/jtsb/statistics_mar.html
13. Marine transportation occurrences in 2021. URL: <https://www.tsb.gc.ca/eng/stats/marine/2021/sssem-ssmo-2021.html>
14. Морской флот отечественных компаний 2021. URL: <http://www.morvesti.ru/analitika/1689/90465/>
15. Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2035 года. URL: <https://docs.cntd.ru/document/563615576>
16. Федеральный закон "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" от 22.07.2008 №123-ФЗ.
17. Таранцев А.А., Поташев Д.А., Куватов В.И. Пожаровзрывобезопасность автомобильных палуб (стоянок) на паромках // Морские интеллектуальные технологии 2022. № 1 часть 1, С. 12—17.
18. Таранцев А.А., Поташев Д.А., Скороходов Д.А. Основы управления пожаровзрывобезопасностью паромных автоперевозок при наличии газобаллонных автомобилей // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 279—283.

References

1. Kozhevina D.F., Estekhin V.G. Otsenka effektivnosti primeneniya ognetushtiteley na vodnom transporte [Evaluation of the efficiency of fire extinguishers use on water transport] // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2022 № 4 (64). S. 8–20.
2. Rossiyskiy Morskoy Registr Sudokhodstva «Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov, chast' VI protivopozharnaya zashchita» [Rules for the classification and construction of sea-going ships, part VI fire protection].
3. Rossiyskoe Klassifikatsionnoe Obshchestvo «Pravila klassifikatsii i postroyki sudov, chast' III Protivopozharnaya zashchita» [Rules for the classification and construction of sea-going ships, part III fire protection]. URL: <https://rfclass.ru>
4. Mezhdunarodnaya Konventsia po okhrane chelovecheskoy zhizni na more 1974 goda SOLAS 74 [International Convention for the safety of life at sea, 1974]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901765675>
5. Postanovlenie Mintransa RF ot 31.10.2003 № 10 «O Pravitakh pozharnoy bezopasnosti na morskikh sudakh». [About fire safety rules on sea vessels]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456065965>
6. Postanovlenie Mintransa RF ot 12.02.2004 № 12 «O pravilakh pozharnoy bezopasnosti pri provedenii ognevykh rabot na sudakh, nakhodyashchikhsya u prichalov morskikh portov i sudoremontnykh predpriyatiy» [Fire safety rules during hot works on vessels located at the berths of sea ports and ship repair facilities]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200036554/titles>
7. Prikaz FTS RF ot 25.08.2008 №1042 «Ob utverzhdenii Nastavleniya po bor'be za zhivuchest' morskikh i rechnykh sudov tamozhennykh organov Rossiyskoy Federatsii» [On approval of the Manual on damage control of sea and river vessels of the customs authorities of the Russian Federation]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902116699>
8. Mezhdunarodnyy kodeks po sistemam pozharnoy bezopasnosti, prinyatyy rezolyutsiey MSC.98(73) [International Code for Fire Safety Systems adopted by resolution MSC.98(73)]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/499032093>
9. Kodeks vnutrennego vodnogo transporta Rossiyskoy Federatsii ot 07.03.2001 № 24-FZ [Code of Inland Water Transport of the Russian Federation]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_30650

10. Sharapov S.V., Krutolapov A.S., Kopeykin N.N. Analiz informatsii o pozharakh na sudakh i o praktike ikh tusheniya v portakh [Analysis of information on fires on ships and on the practice of extinguishing them in ports] // Pozharovzryvobezopasnost'. 2017. T.26 № 1. S. 52–60.
11. Analiz avariynosti na sudakh otechestvennogo flota: sostoyanie, prichiny, tendentsii, neobkhodimye mery [Analysis of accidents on ships of the domestic fleet: state, causes, trends, necessary measures]. A.L. Boran-Keshish'yan, A.N. Tomilin, R.R. Tuktarov.
12. Japan Transport Safety Board, Number of Marine Accidents by Year as of October 31, 2022. URL: https://www.mlit.go.jp/jtsb/statistics_mar.html
13. Marine transportation occurrences in 2021. URL: <https://www.tsb.gc.ca/eng/stats/marine/2021/ssem-ssmo-2021.html>
14. Morskoy flot otechestvennykh kompaniy 2021 [Marine fleet of domestic companies 2021]. URL: <http://www.morvesti.ru/analitika/1689/90465/>
15. Strategiya razvitiya sudostroitel'noy promyshlennosti na period do 2035 goda [Strategy for the development of the shipbuilding industry for the period up to 2035]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/563615576>
16. Federal Law "Technical Regulations on Fire Safety Requirements" dated 22.07.2008 No. 123-FZ
17. Tarantsev A.A., Potashev D.A., Kuvatov V.I. Fire- and explosion safety car decks (parking) on ferries // Marine intellectual technologies, 2022. №1 part 1, P. 12—17.
18. Tarantsev A.A., Potashev D.A., Skorokhodov D.A. Fundamentals of management of fire and explosion safety of ferry road transport in the presence of gas-cylinder vehicles // Marine intellectual technologies, 2022. № 4 part 1, P. 279—283.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дмитрий Федорович Кожевин, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149), e-mail: Yagmort_KDF@mail.ru

Dmitrii F. Kozhevin, candidate of technical sciences, associate professor, chief of the physical and chemical bases of the burning and extinguishing processes department of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: Yagmort_KDF@mail.ru

Александр Алексеевич Таранцев, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук (199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13); профессор Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149); 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), Professor of the Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy ave., 149, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation), e-mail: nfo@iptran.ru

Виталий Геннадьевич Естехин, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (690091, г. Владивосток, п. Аякс, д. 27), e-mail: estekhin@inbox.ru

Vitalii G. Estekhin, adjunct of the faculty of higher training of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (690091, Russia, Vladivostok, 27, Ajax), e-mail: estekhin@inbox.ru

Иван Николаевич Коновалов, 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: simulator.ipt@outlook.com

Ivan N. Konovalov, 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: simulator.ipt@outlook.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.07.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.07.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 01.08.2023.

Статья подготовлена в рамках Государственного задания № 075-01353-23-00 Министерства науки и высшего образования РФ на 2023 год

The article was prepared within the framework of the State Task No. 075-01353-23-00 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in 2023

Научная статья

УДК 656.61.052

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.018>

Итеративный метод планирования движения судна в непредсказуемой навигационной обстановке

А.С. Жук¹ alszhuk@yandex.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. Рассматривается задача гарантированного предотвращения столкновений судов на неограниченном горизонте планирования в условиях непредсказуемого движения судов-целей. Множества достижимости судов-целей с учетом зоны навигационной безопасности определяют области возможных столкновений. Безопасные управления определяются в пространстве скоростей в виде совокупности векторов скорости управляемого судна. Гарантированное предотвращение всех возможных столкновений достигается выбором управления, ведущего за пределы областей возможных столкновений каждого судна-цели. Информация о движении судов-целей ограничена координатами и курсом в текущий момент времени. Судна-цели движутся непредсказуемым образом, но имеют динамические ограничения. Обеспечение безопасности плавания на неограниченном горизонте планирования в условиях непредсказуемости движения судов-целей является приоритетной задачей управления судном. Предварительный маршрут перехода требует коррекции в зависимости от текущей навигационной обстановки. Предлагаемый итеративный метод планирования движения судна в реальном времени обеспечивает гарантированное предотвращение столкновений и минимизирует отклонения от предварительного маршрута перехода. Ожидаемое движение судна-цели определяется на основе текущих параметров. Множества достижимости судов-целей остаются ограниченными в пространстве скоростей даже при увеличении горизонта планирования до бесконечности. Множества достижимости судов-целей дополняются зоной навигационной безопасности и образуют области возможных столкновений. Управления, приводящие вектор скорости управляемого судна за пределы области возможных столкновений в пространстве скоростей, гарантированно предотвращают столкновения даже в условиях непредсказуемости движения судов-целей. Гарантированно безопасные состояния управляемого судна зависят от множеств достижимости судов-целей. Выполненные исследования способствуют совершенствованию перспективных для практического применения в современных навигационных комплексах методов управления судном.

Ключевые слова: методы управления судном, пространство скоростей, множества достижимости, области возможных столкновений.

Для цитирования: Жук А.С. Итеративный метод планирования движения судна в непредсказуемой навигационной обстановке, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 179—187. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.018

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.018>

Iterative method for ship motion planning in unpredictable navigational environment

Alexander S. Zhuk¹ alszhuk@yandex.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. The problem of guaranteed prevention of ship collisions on an unlimited planning horizon under conditions of unpredictable motion of target ships is considered. The reachable sets of target ships, taking into account the navigational safety zone, determine the areas of possible collisions. Safe controls are defined in the speed space as a set of speed vectors of the controlled vessel. Guaranteed avoidance of all possible collisions is achieved by choosing a control that leads outside the areas of possible collisions of each target ship. Information about the movement of target ships is limited to the coordinates and course at the current time. Target ships move in unpredictable ways, but have dynamic limitations. Ensuring the safety of navigation on an unlimited planning horizon in the conditions of unpredictable movement of target ships is a priority task of ship handling. The preliminary passage route requires correction depending on the current navigation situation. The proposed iterative real-time ship motion planning method provides guaranteed collision avoidance and minimizes deviations from the preliminary passage route. The expected motion of the target vessel is determined based on the current parameters. The reachable sets of target ships remain bounded in speed space even as the planning horizon increases to infinity. The reachable sets of target ships are supplemented by a navigational safety zone and form areas of possible collisions. Controls that bring the speed vector of the controlled vessel beyond the limits of the area of possible collisions in the speed space are guaranteed to prevent collisions even in conditions of unpredictable motion of target ships. The guaranteed safe states of the controlled ship depend on the reachable sets of the target ships. The performed research contributes to the improvement of ship control methods that are promising for practical use in modern navigation systems.

Key words: ship handling methods, speed space, reachable sets, areas of possible collisions.

For citation: Alexander S. Zhuk, Iterative method for ship motion planning in unpredictable navigational environment, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 1, P. 179—187. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.018

Введение

Предупреждение столкновений является важной и актуальной задачей управления судном. Условие гарантированного предотвращения столкновений судов можно сформулировать как отсутствие контакта траектории управляемого судна и областей возможных столкновений всех судов-целей на бесконечном горизонте планирования. Управляемое судно может бесконечно оставаться на такой траектории без риска столкновений. Однако, кроме задачи предотвращения столкновений управляемое судно должно выполнять задачу реализации предварительного плана перехода [1 – 5]. Если реализуемая безопасная траектория не проходит через целевую путевую точку маршрута, то необходима коррекция управления. Тогда может оказаться, что траектории, реализующие предварительный план перехода, не гарантируют предотвращение столкновений [6 – 11].

Когда навигационная обстановка структурирована и организована, постоянные безопасные состояния управляемого судна обеспечивают предупреждение столкновений при уменьшении горизонта планирования. Но такие состояния трудно определить в непредсказуемой навигационной обстановке [1, 3 – 5, 7, 8, 11]. В настоящее время современные САПП прогнозируют движение судов-целей на основе определения элементов движения судов-целей в текущий момент времени. Прогнозирование движения выполняется на основе допущения о предсказуемости движения судов-целей, предполагая, что элементы движения судов-целей остаются постоянными. Прогноз корректируется, если элементы движения судна-цели изменились. Прогнозирование будущего движения судов-целей основано только на элементах движения судов-целей доступных в текущий момент времени. Гарантированное предотвращение столкновений с судами-целями, движение которых предсказуемо, затруднений, как правило, не вызывает. Однако, эффективность такого подхода в большой степени зависит от точности и достоверности информации о будущем движении судов-целей. На практике такая информация обычно основана на предположениях и допущениях. Предлагаемый в настоящей работе подход не требует предположений о будущем движении судов-целей и использует понятие множеств достижимости [5, 7, 8, 11 – 17] для определения постоянных безопасных состояний в пространстве скоростей, таким образом, гарантированно достигается безопасность плавания на неограниченном горизонте планирования.

Постановка задачи

Международные требования, SOLAS-74 (глава V, правило 34), STCW-78 (A-VIII/2, часть 2), Резолюция ИМО А-893(21), предписывают обязательное предварительное планирование рейса судна. План перехода включает в себя последовательность путевых точек маршрута. В рамках решаемой задачи считаем, что план перехода выполняется, когда управляемое судно достигает заданной окрестности

целевой путевой точки, например, такую окрестность можно задать в виде круга заданного радиуса с центром в целевой путевой точке. При выполнении условия достижения очередной путевой точки происходит переключение на следующую целевую путевую точку маршрута. Движение судна происходит в условиях непредсказуемого движения судов-целей, при выполнении плана перехода должен исключаться риск столкновений.

Задача настоящей работы заключается в развитии метода гарантированного предотвращения столкновений судов на неограниченном горизонте планирования в условиях непредсказуемой навигационной обстановки, но с динамическими ограничениями управляемого судна и судов-целей.

Каждое судно-цель движется с постоянной линейной скоростью и может развивать угловую скорость до некоторого максимального значения. Динамика судов-целей описывается уравнениями (1) модели машины Дубинса [5 – 9, 11, 12, 18].

$$\dot{x}_T = V \sin K_T; \quad \dot{y}_T = V \cos K_T; \quad |\dot{K}_T| \leq \omega_{max}; \quad \dot{V} = 0, \quad (1)$$

где x_T, y_T – координаты судна-цели в неподвижной системе координат, ориентированной по меридиану на север, и связанной с начальной позицией управляемого судна; V – линейная скорость судна-цели; K_T – курс судна-цели; ω_{max} – максимальная угловая скорость судна-цели.

Для гарантированного предотвращения столкновений судов необходимо определить области возможных столкновений на основе множеств достижимости судов-целей, движущихся непредсказуемым образом [5 – 9, 11, 18].

Область возможных столкновений в момент времени t в пространстве скоростей ОПС_{*i*}(t) определяется на основе области возможных столкновений в плоскости физического водного пространства ОВС_{*i*}(t)

$$\text{ОПС}_i(t) = \frac{\text{ОВС}_i(t)}{t}, \quad \forall t > 0. \quad (2)$$

Объединение всех областей возможных столкновений судов в пространстве скоростей на заданном горизонте планирования определяет совокупность опасных управлений. С увеличением верхней границы горизонта планирования до бесконечности область возможных столкновений в пространстве скоростей определяет гарантированно безопасные траектории постоянных курса и скорости управляемого судна. В дальнейшем такие траектории можно применить к убывающим горизонтам планирования.

Поиск гарантированно безопасной траектории управляемого судна в целевую путевую точку

Система управления, используя информацию о текущем состоянии конфигурации судов-целей, может определить множества возможных столкновений в пространстве скоростей в текущий момент времени ОПС_{*i*}(t). Если текущая траектория управляемого судна удовлетворяла условиям безопасности на бесконечном горизонте

планирования в некоторый предыдущий момент времени, то безопасность гарантирована на бесконечном горизонте планирования и в текущий момент времени для всех множеств возможных столкновений, определенных в текущий момент времени. Кроме того, другие управления, удовлетворяющие этому условию, тоже формируют возможные траектории, гарантирующие предотвращение столкновений. Это могут быть как управления, соответствующие единственным значениям курса и скорости, так и составные траекториям, соответствующие кусочно-линейным траекториям, а также траектории общего вида. Возможность реализации траектории зависит от динамических ограничений управляемого судна.

Координаты x_i, y_i границ области возможных столкновений в плоскости физического водного пространства $ОВС_i(t)$ в неподвижной системе координат, ориентированной по меридиану на север, и связанной с начальной позицией управляемого судна, определяются на основе координат X_i, Y_i границ $ОВС_i(t)$ в системе координат, связанной с судном-целью, и ориентированной вдоль диаметральной плоскости судна-цели, в виде

$$x_i(t) = x_{T0} + X_i \cos K_{T0} + Y_i \sin K_{T0};$$

$$y_i(t) = y_{T0} - X_i \sin K_{T0} + Y_i \cos K_{T0}; t \in [t_0, t_f], \quad (3)$$

где x_{T0}, y_{T0}, K_{T0} – начальные координаты и курс судна-цели, соответственно; t_0, t_f – границы горизонта планирования.

Тогда координаты \dot{x}_i, \dot{y}_i границ $ОПС_i(t)$ определяются уравнениями

$$\dot{x}_i(t) = \frac{x_{T0} + X_i \cos K_{T0} + Y_i \sin K_{T0}}{t};$$

$$\dot{y}_i(t) = \frac{y_{T0} - X_i \sin K_{T0} + Y_i \cos K_{T0}}{t}. \quad (4)$$

Координаты X_i, Y_i дальней границы $ОВС_i(t)$ зависят от курсового угла границы $K \in [-\pi, \pi]$ и определяются уравнениями (5), (6).

Если $\max(-\omega_{max}t, -\pi) \leq K \leq 0$, то

$$X_1(K, t) = -R_{min}(1 - \cos K) + (Vt + KR_{min} + R_{ЗНБ}) \sin K;$$

$$Y_1(K, t) = -R_{min} \sin K + (Vt + KR_{min} + R_{ЗНБ}) \cos K. \quad (5)$$

Если $0 \leq K \leq \min(\omega_{max}t, \pi)$, то

$$X_2(K, t) = R_{min}(1 - \cos K) + (Vt - KR_{min} + R_{ЗНБ}) \sin K;$$

$$Y_2(K, t) = R_{min} \sin K + (Vt - KR_{min} + R_{ЗНБ}) \cos K, \quad (6)$$

где X_1, Y_1, X_2, Y_2 – координаты левого и правого участков дальней границы области возможных столкновений, соответственно; $R_{min} = \frac{V}{\omega_{max}}$ – минимальный радиус поворота судна-цели; $R_{ЗНБ}$ – радиус зоны навигационной безопасности.

Два участка границы $ОВС_i(t)$ являются дугами окружностей радиуса $R_{ЗНБ}$, которые сопрягаются с левой (5) и правой (6) частями дальней границы $ОВС_i(t)$, определяются уравнениями (7), (8).

Если $-\pi \leq K \leq -\omega_{max}t$, то

$$X_3(K, t) = -R_{min}(1 - \cos(\omega_{max}t)) + R_{ЗНБ} \sin K;$$

$$Y_3(K, t) = R_{min} \sin(\omega_{max}t) + R_{ЗНБ} \cos K; \quad (7)$$

Если $\omega_{max}t \leq K \leq \pi$, то

$$X_4(K, t) = R_{min}(1 - \cos(\omega_{max}t)) + R_{ЗНБ} \sin K$$

$$Y_4(K, t) = R_{min} \sin(\omega_{max}t) + R_{ЗНБ} \cos K, \quad (8)$$

где X_3, Y_3, X_4, Y_4 – координаты левой и правой дуг окружностей, формирующих участки границы $ОВС_i(t)$, соответственно.

Если $|\omega_{max}t| \geq \pi$, тогда дуги окружностей (7), (8) вырождаются и не формируют части границ $ОВС_i(t)$.

Ближняя граница области возможных столкновений в физическом водном пространстве $ОВС_i(t)$ или в пространстве скоростей $ОПС_i(t)$ определяется отрезком прямой, соединяющим крайние точки дальней границы $ОВС_i(t)$ или $ОПС_i(t)$, соответственно.

На каждой итерации программирования движения, через промежутки времени $\Delta T = 6 \text{ минут}$, на горизонте планирования τ для каждого судна-цели определяются множества возможных столкновений в пространстве скоростей $ОПС_i(\tau)$. Векторы скорости управляемого судна, находящиеся вне границ каждой $ОПС_i(\tau)$, формируют траектории с постоянными курсом и скоростью, которые гарантируют предупреждение столкновений в отношении судов-целей на заданном горизонте планирования. Если заданы запрещенные для плавания районы (No Go Areas), то из возможных безопасных управлений исключаются траектории, приводящие к контакту с ограждающими изолиниями запрещенных для плавания районов за время $t = \tau$. При этом динамическая выполнимость безопасных траекторий определяется условием

$$|K_{i+1}^C - K_i^C| \leq \Delta K^C, \quad (9)$$

где K_{i+1}^C, K_i^C – курсы управляемого судна на текущей и предыдущей итерациях, соответственно; ΔK^C – динамическое ограничение на управление.

Отметим, что динамические ограничения управляемого судна никак не связаны с условиями предотвращения столкновений. Уравнения динамики управляемого судна не используются при определении $ОПС_i(\tau)$. Таким образом, предлагаемый алгоритм предотвращения столкновений является универсальным для любых моделей динамики управляемого судна.

Динамически выполнимые траектории с постоянными курсом и скоростью, гарантирующие предотвращение столкновений на горизонте планирования τ , ранжируются на основе простого эвристического правила: каждая возможная безопасная траектория определяется на промежутке времени ΔT , выбирается траектория с ближайшими к целевой путевой точке конечными координатами. В общем случае пошаговый подход к программированию движения судна не решает задачу оптимального быстрогодействия, но в большинстве случаев является простым, быстрым и эффективным решением задачи безопасного движения судна в целевую путевую точку [3, 5, 11, 19 – 21]. В настоящей работе главное внимание уделено определению условий гарантированного предотвращения столкновений судов, которые должны удовлетворяться при выполнении судном плана перехода. Важным преимуществом такого подхода является определение гарантированно безопасных траекторий с постоянными курсом и скоростью.

Возможные безопасные управления определяются границами ОПС_{*i*}(τ) и их пересечением с кинематическими и динамическими ограничениями самого управляемого судна. К кинематическим ограничениям относятся ограждающие изолинии запрещенных для плавания районов, к динамическим – ограничения на линейную и угловую скорости управляемого судна [3, 7, 8, 13].

В любой последующий момент времени можно вновь определить ОПС_{*i*}(t) с целью улучшить программную траекторию. Перепрограммирование траектории можно выполнить через заданные промежутки времени, либо перепрограммирование может быть инициировано оценкой качества выполнения маршрута. Может оказаться, что лучшая траектория не существует, кроме того, не гарантируется возможность достижения целевой путевой точки маршрута, но текущая программа движения может быть выполнена без риска столкновений на неограниченном горизонте планирования, если области возможных столкновений в пространстве скоростей определены на неограниченном горизонте планирования. Таким образом, если в начальный момент времени определены множества возможных столкновений, определяющие начальную навигационную обстановку в пространстве скоростей на неограниченном горизонте планирования, и существует хотя бы одна выполнимая траектория, проходящая за пределами этих областей, то итеративный подход к программированию движения судна обеспечивает гарантированное предотвращение столкновений на неограниченном горизонте планирования. Важно отметить, что гарантированное предотвращение столкновений не зависит каким-либо образом от определения областей возможных столкновений на последующих итерациях, которые служат для поиска безопасных траекторий, проходящих через целевую путевую точку. Предлагаемый подход отличается гарантированным предотвращением столкновений в условиях непредсказуемой навигационной обстановки.

Моделирование процессов

Моделируется движение управляемого судна в навигационной обстановке с одним судном-целью, движущимся в начальный момент времени T_0 из точки с координатами x_{T_0}, y_{T_0} курсом $K_{T_0} = 230^\circ$ с постоянной линейной скоростью $V = 10$ узлов и максимальной угловой скоростью $\omega_{max} = 10$ радиан/час (~ 9.5 °/мин), что соответствует минимальному радиусу поворота $R_{min} = 1.0$ морская миля. Управляемое судно движется со скоростью 15 узлов. Для удобства практического применения и соответствия традиционным методам расчета маневра примем промежуток времени между последовательными определениями областей возможных столкновений равным $\Delta T = 0.1$ часа (6 минут). Введем ограничение на максимальную угловую скорость управляемого судна в виде условия, что за время между последовательными определениями областей возможных столкновений управляемое судно способно изменить курс не более чем на $\Delta K^c = 1$ радиан ($\sim 57.3^\circ$). Зона навигационной безопасности представляет собой круг радиуса $R_{знб} = 1.0$ морская миля.

Угловые скорости судов-целей могут принимать значения в пределах $[-\omega_{max}, \omega_{max}]$ и обновляются каждые 3 – 6 минут. Если угловые скорости судов-целей изменяются слишком часто, то, как правило, такой сценарий не представляет большого интереса в части предотвращения столкновений.

На рисунках 1, 2 представлены множества возможных столкновений в физическом водном пространстве и в пространстве скоростей, соответственно. Для каждой итерации из множества гарантированно безопасных курсов выбирается целевой курс, обеспечивающий минимальное отклонение от курса в целевую путевую точку. Целевой курс определяется в пространстве скоростей (см. рис. 2) как вектор, направленный в точку пересечения огибающей множеств возможных столкновений и окружности с центром в начале координат и радиусом, равным скорости управляемого судна. Линия курса управляемого судна выделена синим пунктиром, направление в целевую путевую точку – черным, целевой курс – фиолетовым. На каждой итерации максимальное изменение курса в сторону левого и правого борта обозначено красной и зеленой линиями, соответственно.

Как правило, в последующие моменты времени область безопасных траекторий расширяется. При этом область безопасных траекторий в последующий момент времени включает в себя область безопасных траекторий в текущий момент времени. Управляемое судно безопасно достигнет целевой путевой точки, если отношение расстояния по безопасной траектории до путевой точки к скорости управляемого судна на этой траектории меньше горизонта планирования области возможных столкновений. Если таких траекторий не существует, то выбор траектории может быть основан на различных эвристических правилах. Например, можно выбрать безопасную траекторию, которая реализует минимальную дистанцию кратчайшего сближения с целевой путевой точкой, другими

словами, безопасный курс управляемого судна должен быть направлен максимально близко к пеленгу на целевую путевую точку. Управляемое судно может продолжать двигаться по такой безопасной траектории до момента очередного определения областей возможных столкновений, при этом выполняются анализ новой навигационной обстановки и выбор новой безопасной траектории, которая должна обеспечивать меньшую дистанцию кратчайшего сближения с целевой путевой точкой, чем в момент предыдущей итерации. Если такая траектория существует, то выполняется перепрограммирование движения. Либо система управления может выбрать некоторую целевую область водного пространства близкую к целевой путевой точке. Такой выбор должен включать в себя условия динамической выполнимости маневра из этой области в целевую путевую точку, если в некоторый последующий момент времени окажется, что навигационная обстановка гарантированно позволяет выполнить такой маневр без риска столкновений. При выборе безопасной траектории так же можно учесть условия минимальных динамических затрат управляющего судном комплекса [4, 11, 13, 19 – 21].

В настоящей работе курс управляемого судна на каждой итерации определялся условием гарантированного предотвращения столкновений при минимальном отклонении от пеленга на целевую путевую точку.

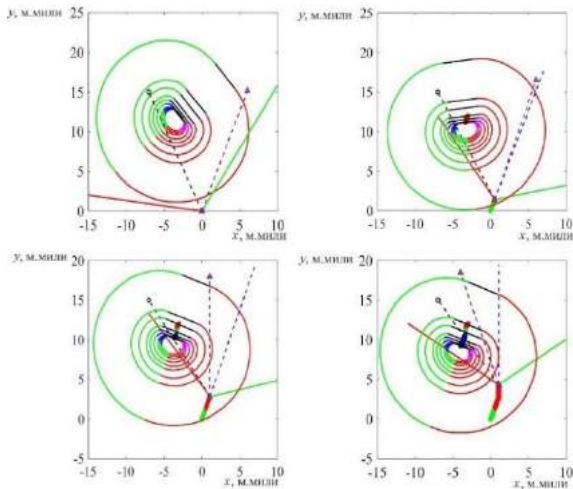


Рис. 1. Множества возможных столкновений в физическом водном пространстве и развитие процесса сближения судов в моменты времени $T=0$, $T=6$ мин, $T=12$ мин, $T=18$ мин

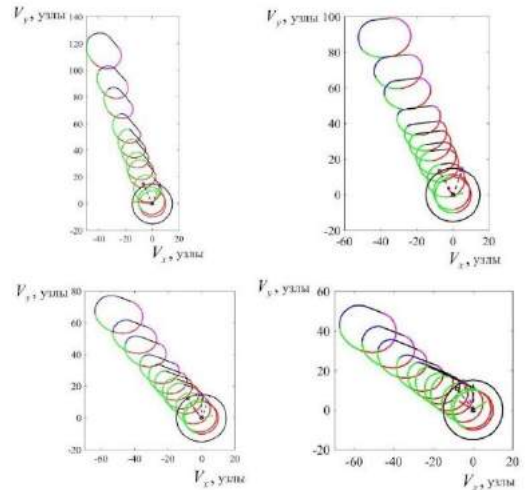


Рис. 2. Множества возможных столкновений в пространстве скоростей и определение гарантированно безопасных управлений в моменты времени $T=0$, $T=6$ мин, $T=12$ мин, $T=18$ мин

На рисунках 3, 4 представлено дальнейшее развитие процесса расхождения судов. Даже при неблагоприятном изменении курса судном-целью в сторону управляемого судна итеративный метод планирования движения в реальном времени формирует гарантированно безопасные траектории. С увеличением курсового угла судна-цели сектор безопасных векторов скорости управляемого судна разворачивается в сторону целевой путевой точки. Момент времени, когда пеленг на целевую путевую точку окажется в пределах сектора гарантированно безопасных курсов, назовем моментом освобождения от опасности столкновения, после которого происходит переключение задачи предотвращения столкновения на задачу движения в целевую путевую точку.

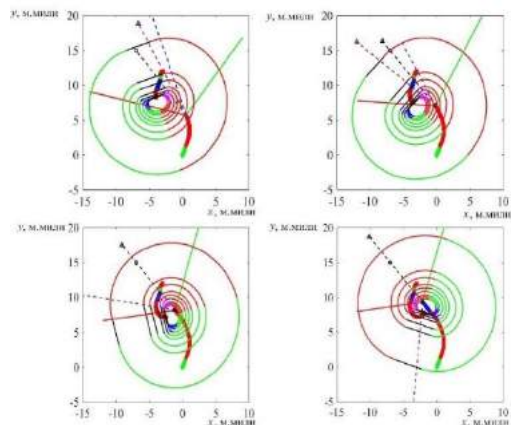


Рис. 3. Множества возможных столкновений в физическом водном пространстве и развитие процесса сближения судов в моменты времени $T=24$ мин, $T=30$ мин, $T=36$ мин, $T=42$ мин

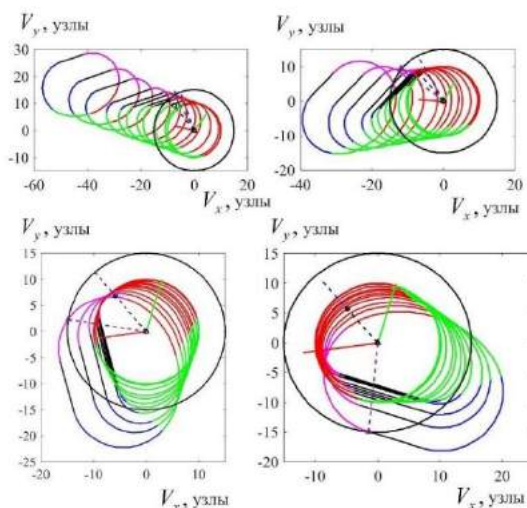


Рис. 4. Множества возможных столкновений в пространстве скоростей и определение гарантированно безопасных управлений в моменты времени $T=24$ мин, $T=30$ мин, $T=36$ мин, $T=42$ мин

Важно отметить, что такой подход не полон, области возможных столкновений в пространстве скоростей позволяют определить совокупность только тех безопасных траекторий, которые соответствуют только лишь постоянным значениям курса и скорости управляемого судна. Могут существовать криволинейные и кусочно-линейные сопрягающиеся траектории с переменной скоростью, которые так же являются безопасными, позволяют избежать ситуаций окружения управляемого судна судами-целями и при этом проходят через целевую путевую точку, но предлагаемый подход не позволяет определить такие траектории. Однако, предлагаемый метод гарантирует, что управляемое судно не окажется в ситуации окружения судами-целями, если такая ситуация не является начальной навигационной обстановкой.

На рисунке 5 представлены изменения элементов сближения управляемого судна и судна-цели.

На графике слева синим цветом представлен заданный курс управляемого судна на каждой итерации, красным – курс судна-цели, синим пунктиром – пеленг на целевую путевую точку, черным пунктиром – отклонение курса управляемого судна от пеленга на целевую путевую точку. При неблагоприятном развитии движения судна цели ($T = 0.1$ часа), заданный курс практически не меняется, при этом остается гарантированно безопасным, как бы ни маневрировало судно-цель. При благоприятном движении судна-цели ($T = 0.2 - 0.3$ часа) возникает возможность значительно сократить отклонение курса управляемого судна от пеленга на целевую путевую точку. В дальнейшем, при изменении курса судном-целью в сторону управляемого судна ($T = 0.4$ часа) скорость коррекции курса управляемого судна в сторону целевой путевой точки уменьшается. После освобождения от опасности столкновения ($T = 0.5$ часа) любое возможное движение судна-цели не влияет на движение управляемого судна.

На графике справа синей сплошной линией представлено изменение расстояния до целевой путевой точки, красной сплошной линией –

изменение расстояния между судами, синим пунктиром – изменение расстояния до целевой путевой точки при движении по прямому маршруту, черным пунктиром – отклонение от прямого маршрута. После момента времени $T = 0.3$ часа отклонение от прямого маршрута перестает существенно накапливаться, курс судна постепенно корректируется и после освобождения от опасности столкновения ($T = 0.5$ часа) становится равным пеленгу на целевую путевую точку, управляемое судно возвращается на прямой маршрут. Дистанция кратчайшего сближения с судном-целью оказалась большой целевой дистанции (1 м.миля), так как после освобождения от опасности столкновения заданный курс не связан с границей области возможных столкновений.

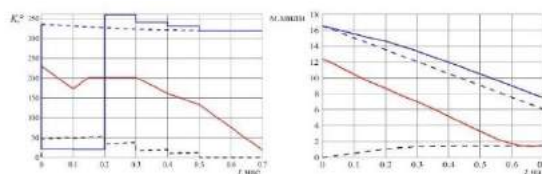


Рис. 5. Элементы сближения управляемого судна и судна-цели

На рисунке 6 представлены траектории сближения судов. Траектория управляемого судна изображена синим цветом, судна-цели – красным. Пунктиром отмечена заданная программная траектория движения управляемого судна в целевую путевую точку после остановки моделирования. Важно отметить, что достижение целевой путевой точки само по себе не обеспечивает безопасность плавания, управляемое судно должно иметь возможность перехода в следующее безопасное состояние после достижения целевой путевой точки. Такой подход позволяет гарантированно исключить риск столкновений на неограниченном горизонте планирования.

При моделировании не учитывалась динамика управляемого судна, а лишь вводилось ограничение на максимальное изменение курса на каждой итерации без учета времени и траектории при изменении курса. Таким образом, модель сближения судов отражает заданные методом планирования в реальном времени курсы и траектории управляемого судна. Судно не способно мгновенно изменить курс и/или скорость для перемещения вектора скорости за пределы области возможных столкновений в пространстве скоростей. В дальнейшем необходимо разработать метод, учитывающий промежуток времени выполнения маневра. Соответствующий участок траектории маневра курсом и/или скоростью должен сопрягаться с безопасной траекторией [2, 3, 5, 11, 22], кроме того, предупреждение столкновений должно быть гарантировано во время самого маневра. Традиционно в практике судовождения при планировании маршрута ограничения на динамику управляемого судна при изменении курса задаются минимальным радиусом поворота управляемого судна.

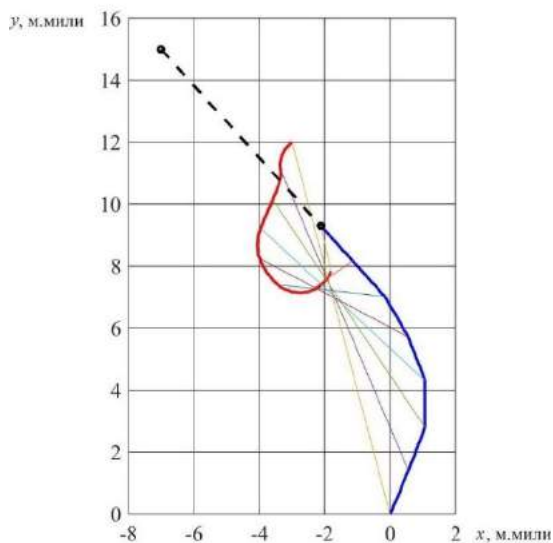


Рис. 6. Траектории сближения судов

Система управления должна одновременно решать долгосрочную задачу предотвращения столкновений и краткосрочную задачу движения в целевую путевую точку, реагируя на изменения навигационной обстановки. В зависимости от обстоятельств случаи области возможных столкновений в пространстве скоростей могут использоваться на различных ограниченных горизонтах планирования. В стесненных водах, когда водное пространство безопасно для движения управляемого судна ограничено запрещенными для плавания районами (No Go Areas), ненулевой вектор скорости управляемого судна на неограниченном горизонте планирования может привести к контакту с такими районами. Когда судно пересекло точку «невозврата» (Abort point), любой ненулевой вектор скорости управляемого судна на бесконечном горизонте планирования приведет к контакту судна с

запрещенным для плавания районом. Ограниченные горизонты планирования не обеспечивают долгосрочное гарантированное отсутствие риска столкновений, но учитывают стесненность безопасной для плавания акватории.

Заключение

Итеративный подход к программированию движения судна на основе множеств достижимости судов-целей может быть использован для решения многофакторных задач предотвращения столкновений в сложной непредсказуемой навигационной обстановке. Множественные суда-цели движутся произвольным непредсказуемым образом, но с заданными динамическими ограничениями. Задача управляемого судна заключается в том, чтобы выполнить переход по предварительному маршруту через заданные целевые путевые точки и при этом гарантированно исключить риск столкновений. Системе управления известны параметры моделей (скорость, радиус поворота, радиус зоны навигационной безопасности) и текущие координаты и курсы судов-целей для определения областей возможных столкновений в пространстве скоростей. При этом система управления не обладает какой-либо другой дополнительной информацией. Через заданные промежутки времени система управления определяет области возможных столкновений в пространстве скоростей каждого судна-цели и на основе заданных эвристических правил выбирает и реализует безопасную и динамически выполнимую траекторию, которая приближает решение задачи прихода судна в целевую путевую точку.

Главный результат предлагаемого метода заключается в том, что на основе определения областей возможных столкновений в пространстве скоростей на неограниченном горизонте планирования гарантированно исключается риск столкновений, и вместе с тем реализуются возможности движения в целевую путевую точку.

Литература

1. Боран-Кешишьян А.Л., Попов В.В. Анализ моделей управления потоком судов в морских портах в развитии концепции e-навигации // Эксплуатация морского транспорта. 2018. № 1 (86). С. 91 – 95.
2. Жук А.С. Формирование программных траекторий судна на основе составных сплайнов Эрмита // Эксплуатация морского транспорта. 2013. № 1 (71). С. 26 – 31.
3. Коренев Г.В. Цель и приспособляемость движения. М.: Наука, 1974. 528 с.
4. Astrein V.V., Kondratyev S.I., Boran-Keshishyan A.L. Multicriteria assessment of optimal forecasting models in decision support systems to ensure the navigation safety. Journal of Physics: Conference Series. "International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021". 2021. p. 012108.
5. LaValle S.M. Planning Algorithms. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
6. Ветчинкин А.С., Стариченков А.Л. Формирование траектории сближения морских подвижных объектов // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 1 том 1. С. 113 – 117.
7. Жук А.С. Метод построения области возможного столкновения судов на основе множеств достижимости // Эксплуатация морского транспорта. 2022. № 4 (105). С. 3 – 10. DOI: 10.34046/aumsuomt105/2
8. Жук А.С. Множества возможных столкновений судов в пространстве скоростей // Эксплуатация морского транспорта. 2023. № 1 (106). С. 27 – 36. DOI: 10.34046/aumsuomt106/5
9. Коренев А.С., Хабаров С.П., Шпекторов А.Г. Использование решения задачи «машины Дубинса» для исключения ситуации опасного сближения двух судов // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 127 – 135.
10. Lin Y., Saripalli S. Collision avoidance for UAVs using reachable sets. 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE. 2015.
11. Wu A. Guaranteed Avoidance of Unpredictable, Dynamically Constrained Obstacles using Velocity Obstacle Sets. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2011. 116p.
12. Кумков С.И., Пацко В.С., Пятко С.Г., Федотов А.А. Построение множества разрешимости в задаче проводки

- самолета при ветровом возмущении // Труды института математики и механики УрО РАН. 2005. Том 11, № 1. С. 149 – 159.
13. Черноусько Ф.Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов. М.: Наука, 1988. 319 с.
 14. Fedotov A., Patsko V., Turova V. Reachable Sets for Simple Models of Car Motion. Recent Advances in Mobile Robotics. 2011. p. 147 – 172.
 15. Allen R.E., Clark A.A., Starek J.A., Pavone M. A Machine Learning Approach for Real-Time Reachability Analysis. 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE. 2014.
 16. Holmes P., Kousik S., Zhang B., Raz D., Barbalata C., Johnson-Roberson M., Vasudevan R. Reachable Sets for Safe, Real-Time Manipulator Trajectory Design. Robotics: Science and Systems, 2020.
 17. Mitchell I.M., Bayen A.M., Tomlin C.J. A time-dependent Hamilton-Jacobi formulation of reachable sets for continuous dynamic games. IEEE Transactions on Automatic Control. 50. 2005. p. 947 – 957.
 18. Zhuk A.S. Guaranteed safe states in speed space for ships collision avoidance problem. Current Problems in Applied Mathematics and Computer Science and Systems. APAMCS 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham. – 2023. – Vol. 702. DOI: 10.1007/978-3-031-34127-4_43
 19. Dantsevich I., Lyutikova M., Fedorenko V. Numerical Method for Correcting Command Signals for Combined Control of a Multiengined Complex. International Conference on Mathematics and its Applications in new Computer Systems. Springer, Cham, 2022. p. 117-131.
 20. Kondratyev S.I., Boran-Keshishyan A.L., Popov V.V., Slitsan A.E. Human-machine system as a control shell in the implementation of mooring operations. Journal of Physics: Conference Series. "International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021". 2021. p. 012045
 21. Shima T., Rasmussen S. UAV Cooperative Decision and Control. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009. 164p.
 22. Жук А.С. Программирование движения судна на основе уравнений кривых второго порядка // Эксплуатация морского транспорта. 2011. № 2 (64). С. 25 – 29.

References

1. Boran-Keshishyan A.L., Popov V.V. Analiz modeley upravleniya potokom sudov v morskikh portakh v razvitii kontseptsii e-navigatsii [Analysis models control the flow of ships in the sea ports in the development of the concept of e-navigation]. Eksploatatsiya morskogo transporta. 2018. № 1 (86). p. 91 – 95. (in Russian)
2. Zhuk A.S. Formirovanie programmnykh traektoriy sudna na osnove sostavnykh splaynov Ermita [Formation of ship program trajectories on basis of composite Hermite splines]. Eksploatatsiya morskogo transporta, 2013, № 1 (71), p. 26 – 31. (in Russian)
3. Korenev G.V. Tsel' i prisposoblyaemost' dvizheniya [Purpose and adaptability of motion]. M.: Nauka, 1974. 528 p. (in Russian)
4. Astrein V.V., Kondratyev S.I., Boran-Keshishyan A.L. Multicriteria assessment of optimal forecasting models in decision support systems to ensure the navigation safety. Journal of Physics: Conference Series. "International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021". 2021. p. 012108.
5. LaValle S.M. Planning Algorithms. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
6. Vetchinkin A.S., Starichenkov A.L. Formirovanie traektorii sblizheniya morskikh podvizhnykh ob"ektov [Formation of the trajectory of convergence of marine mobile objects]. Marine intellectual technologies, 2020, № 1 part 1, p. 113 – 117. (in Russian)
7. Zhuk A.S. Metod postroeniya oblasti vozmozhnogo stolknoveniya sudov na osnove mnozhestv dostizhimosti [Method of possible ships collision area constructing on reachable sets basis]. Eksploatatsiya morskogo transporta, 2022, № 4 (105), p. 3 – 10. DOI: 10.34046/aumsuomt105/2 (in Russian)
8. Zhuk A.S. Mnozhestva vozmozhnykh stolknoveniy sudov v prostranstve skorostey [The possible vessels collisions sets in speed space]. Eksploatatsiya morskogo transporta, 2023, № 1 (106), p. 27 – 36. DOI: 10.34046/aumsuomt106/5 (in Russian)
9. Korenev A.S., Khabarov S.P., Shpectorov A.G. Ispol'zovanie resheniya zadachi "mashiny Dubinsa" dlya isklucheniya situatsii opasnogo sblizheniya dvukh sudov [Application of the Dubins path problem to avoid the dangerously close approach of two vessels]. Marine intellectual technologies, 2022, № 2 part 1, p. 127 – 135. (in Russian)
10. Lin Y., Saripalli S. Collision avoidance for UAVs using reachable sets. 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE. 2015.
11. Wu A. Guaranteed Avoidance of Unpredictable, Dynamically Constrained Obstacles using Velocity Obstacle Sets. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2011. 116p.
12. Kumkov S.I., Patsko V.S., Pyatko S.G., Fedotov A.A. Postroenie mnozhestva razreshimosti v zadache provodki samoleta pri vetrovom vozmushchenii [Construction of a solvability set in the problem of aircraft handling under wind disturbance]. Trudy instituta matematiki i mekhaniki UrO RAN. 2005. Tom 11, No. 1. S. 149 – 159. (in Russian)
13. Chernousko F.L. Otsenivanie fazovogo sostoyaniya dinamicheskikh sistem [State estimation for dynamic systems]. M.: Nauka, 1988. 319 p. (in Russian)
14. Fedotov A., Patsko V., Turova V. Reachable Sets for Simple Models of Car Motion. Recent Advances in Mobile Robotics. 2011. p. 147 – 172.
15. Allen R.E., Clark A.A., Starek J.A., Pavone M. A Machine Learning Approach for Real-Time Reachability Analysis. 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE. 2014.
16. Holmes P., Kousik S., Zhang B., Raz D., Barbalata C., Johnson-Roberson M., Vasudevan R. Reachable Sets for Safe, Real-Time Manipulator Trajectory Design. Robotics: Science and Systems, 2020.

17. Mitchell I.M., Bayen A.M., Tomlin C.J. A time-dependent Hamilton-Jacobi formulation of reachable sets for continuous dynamic games. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 50. 2005. p. 947 – 957.
18. Zhuk A.S. Guaranteed safe states in speed space for ships collision avoidance problem. *Current Problems in Applied Mathematics and Computer Science and Systems*. APAMCS 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham. – 2023. – Vol. 702. DOI: 10.1007/978-3-031-34127-4_43
19. Dantsevich I., Lyutikova M., Fedorenko V. Numerical Method for Correcting Command Signals for Combined Control of a Multiengined Complex. *International Conference on Mathematics and its Applications in new Computer Systems*. Springer, Cham, 2022. p. 117-131.
20. Kondratyev S.I., Boran-Keshishyan A.L., Popov V.V., Slitsan A.E. Human-machine system as a control shell in the implementation of mooring operations. *Journal of Physics: Conference Series*. "International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021". 2021. p. 012045
21. Shima T., Rasmussen S. *UAV Cooperative Decision and Control*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009. 164p.
22. Zhuk A.S. Программирование движения судна на основе уравнений кривых второго порядка [Ship movement programming on basis of quadric curve equations]. *Эксплуатация морского транспорта*, 2011, № 2 (64), p. 25 – 29. (in Russian)

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Сергеевич Жук, кандидат технических наук, капитан, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра развития безэкипажного судоходства, ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», 353924, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: alszhuk@yandex.ru

Alexander S. Zhuk, PhD (Eng), Master Mariner, senior researcher of the autonomous navigation development research center, Admiral Ushakov Maritime State University, 93 Lenin Avenue, Novorossiysk, 353924, Russian Federation. e-mail: alszhuk@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 22.06.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.07.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 15.08.2023.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Научная статья

УДК 539.374

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.019>

Воздействие предварительного подогрева кромки пластины из стали 30ХГСА на распределение остаточных напряжений при электродуговом процессе.

А.В. Ткачева¹ 4nansi4@mail.ru, Е.Е. Абашкин¹ abashkine@mail.ru

¹Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН

Аннотация. Работа посвящена исследованию процесса предварительного подогрева кромки стальной пластины перед формированием сварного шва при осуществлении электродуговой сварки. Решается задача температурных напряжений. Исследуется возможность уменьшения интенсивности остаточных напряжений, образованных в результате локального теплового воздействия, путем применения предварительного подогрева кромки пластины с обратной стороны пластины от сварочной дуги. Распределение температуры определяется с помощью решения нелинейного уравнения теплопроводности, в котором удельная теплоемкость и теплопроводность зависят от температуры. Источник тепла моделируется методом с использованием двойного эллипсоида, предложенным Джон А. Голдаком. Предполагалось, что предварительный подогрев кромки с обратной стороны от сварочной дуги уменьшает температурный градиент в материале по всей толщине, тем самым способствует снижению уровня остаточных напряжений в металлической пластине. Изучалось влияние толщины пластины и скорости прохождения электродуговой сварки с предварительным подогревом кромки на распределение интенсивности остаточных напряжений.

Материал принимается упруговязкопластическим, деформации малыми и складываемыми из обратимых и необратимых. Обратимые деформации связаны с напряжениями законом Дюамеля-Неймана. Необратимые деформации растут при выполнении условия пластического течения Мизеса, в котором присутствует компонента скорости пластической деформации, отвечающая за вязкость пластического течения. Упругие модули (модуль Юнга, коэффициент Пуассона) и предел текучести полагаются зависимыми от температуры. Решение механической части задачи находится методом простых итераций.

В результате работы, по полученным распределениям интенсивности остаточных напряжений в материале пластин, делается вывод о том, что использование предварительного подогрева кромки пластин с обратной стороны прохождения сварочной дуги снижает интенсивность остаточных напряжений.

Ключевые слова: сварка, температурные напряжения, упругость, пластичность, стальная пластина.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Хабаровского Федерального научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Для цитирования: Ткачева А.В., Абашкин Е.Е. Воздействие предварительного подогрева кромки пластины из стали 30ХГСА на распределение остаточных напряжений при электродуговом процессе, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 188—199. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.019

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.019>

The effect of preheating the edge of a plate made of steel 30khgsa on the distribution of residual stresses in the electric arc process

Anastasia V. Tkacheva¹ 4nansi4@mail.ru, Evgeny E. Abashkin¹ abashkine@mail.ru

¹Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science, Khabarovsk Territory, Komsomolsk on the Amur, Russian Federation

Abstract. The work is devoted to the study of the process of preheating the edge of a steel plate before the formation of a weld in the implementation of electric arc welding. The problem of temperature stresses is solved. The possibility of reducing the intensity of residual stresses formed as a result of local thermal action is investigated by applying preheating of the plate edge on the reverse side of the plate from the welding arc. The temperature distribution is determined by solving a non-linear heat equation, in which the specific heat capacity and thermal conductivity depend on temperature. The heat source is modeled using the double ellipsoid method proposed by John A. Goldak. It was assumed that preheating of the edge on the reverse side of the welding arc reduces the temperature gradient in the material over the entire thickness, thereby helping to reduce the level of residual stresses in the metal plate. The influence of the plate thickness and the speed of arc welding with preheating of the edge on the distribution of the intensity of residual stresses was studied.

The material is assumed to be elastoviscoplastic, the deformations are small and consist of reversible and irreversible ones. Reversible deformations are related to stresses by the Duhamel-Neumann law. Irreversible strains increase when the von Mises plastic flow condition is satisfied, in which there is a plastic strain rate component responsible for the

© Ткачева А.В., Абашкин Е.Е. 2023

plastic flow viscosity. The elastic moduli (Young's modulus, Poisson's ratio) and the yield strength are assumed to be temperature dependent. The solution of the mechanical part of the problem is found by the method of simple iterations. As a result of the work, according to the obtained distributions of the intensity of residual stresses in the material of the plates, it is concluded that the use of preheating of the edge of the plates on the reverse side of the passage of the welding arc reduces the intensity of residual stresses.

Key words: welding, thermal stresses, elasticity, plasticity, steel plate

Financial Support: The work was carried out within the framework of the state task of the Khabarovsk Federal Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Anastasia V. Tkacheva, Evgeny E. Abashkin, Study of Local Combined Heat Impact on Permanent Joints, Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 1, P. 188—199. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.019

Введение

Сварка металлоконструкций массово востребована в промышленном производстве. Из-за высокого градиента температур, вызванного источником тепла исходящим от электрической дуги, в зоне термического влияния (ЗТВ) нередко образуются локальные температурные деформации, приводящие к отклонению геометрической точности деталей в сборке. Эта проблема хорошо известна и ее решение является актуальной задачей на сегодняшний день. Источником нежелательных температурных деформаций служит локальное распространение больших температурных напряжений. Для понижения уровня остаточных напряжений используются различные методы, такие как последующий прогрев всей конструкции в печи [1-4], либо локальные удары вблизи зоны ЗТВ и предварительный подогрев кромок сопрягаемых деталей перед сваркой.

На сегодняшний день существует несколько вариантов предварительного нагрева: печь, резистивный нагрев, индукционный нагрев и открытое пламя [5, 6]. Печь применяют для нагрева всего образца до заранее определенной температуры. При резистивном нагреве керамической прокладки, нагреваемой электрическим сопротивлением до определенной температуры, передается тепло объекту сварки. Благодаря индукционному нагреву создается электромагнитное поле, которое равномерно нагревает область зоны сварки. Использование метода открытого пламени приводит к неравномерному нагреву.

В работе [7] установлено снижение примерно на 35-50% остаточных напряжений в продольном и поперечном направлениях в стальной трубе, полученной в процессе сварки с предварительным нагревом. Для случая сварки трением предварительный подогрев также эффективен [8, 9], поскольку способствует устранению дефекта отрыва, следовательно, получается бездефектное соединение, при этом уменьшается износ инструмента, увеличивается прочность на растяжение сварного соединения. Установлено, что предварительный индукционный нагрев при сварки с трением с высокой скоростью для разнородных материалов, увеличивается диффузия, уменьшается зерно, улучшаются механические свойства [10].

Многоэлементный электронно-лучевой предварительный подогрев титановой пластины приводит к уменьшению максимальных остаточных напряжений на 48,3%. Для лазерной и лазерно-дуговой сварки сталей больших толщин (20 мм и 45

мм) применяется индукционный предварительный нагрев [11, 12]. В случаях, где это необходимо, помимо предварительного нагрева используют последующий за источником тепла нагрев [13], что уменьшает скорость кристаллизации.

Предварительный нагрев низкоуглеродистой стали до 100 °С в муфельной печи обеспечивает более качественное сварное соединение по сравнению с нагревом, осуществляемым при помощи предварительного наложения сварного шва методом сварки в инертных газах, но не оказывает особого влияния на микротвердость [14].

В работах [15-17] приведены исследования процесса электродуговой сварки с учетом предварительного нагрева, который моделировался параллельно шву, без опережения сварочной ванны, и осуществлялся кислородно-ацетиленовым пламенем на расстоянии 30 мм в обе стороны от зоны сварки.

Многолучевой предварительный нагрев, описанный в [18], применяется для сварки тонких пластин. Он уменьшает коробление на 80%. Для достижения бездефектного сварного соединения авторы работы [19] применяли процесс предварительного нагрева. Прочность на разрыв сварного соединения при соответствующем предварительном подогреве достигала 90 % от прочности основного металла [20].

Если деталь имеет большие габариты, то разогреть ее до однородной температуры не представляется возможным, поэтому, следует использовать нагрев металлической пластины с обратной стороны от сварного электрода (источника тепла), для снижения остаточных напряжений и деформаций. Было установлено, что отвод тепла с пластины с обратной стороны от сварочной ванны повышает напряженное состояние, что свидетельствует о нехватке тепла в момент образования сварного шва с обратной стороны пластины [21]. Также исследовалось влияние предварительного локального нагрева кромки пластины в процессе электродуговой сварки под флюсом [22]. Установлено, что предварительный нагрев пластины с обратной стороны от сварного шва до 200°С понижает интенсивность остаточных напряжений при этом ширина источника не должна превышать ширину сварочной ванны. Цель работы - выявление оптимальной скорости прохождения сварного источника с предварительным подогревом кромки и оптимальной толщины пластины, при которых будет достигаться наименьшая интенсивность остаточных напряжений.

Основа математической модели

Пусть в пластине отсутствуют необратимые деформации. Деформации считаем малыми d_{ij} и складываемыми из обратимых e_{ij} и необратимых p_{ij}

$$d_{ij} = 0.5(u_{i,j} + u_{j,i}) = e_{ij} + p_{ij} \quad (1)$$

Соотношение Дюамеля-Неймана описывает связь между напряжением упругой деформацией и температурой

$$\sigma_{ij} = (\lambda e_{kk} - 3\alpha K(T - T_0))\delta_{ij} + 2\mu e_{ij}, \quad (2)$$

$$\lambda, \mu, K = \frac{2}{3}\mu + \lambda \text{ упругие модули, } \alpha -$$

коэффициент линейного расширения

Упругие модули зависят от температуры, что подтверждается экспериментально [23-28]. Для нашего случая применяем их линейную зависимость.

$$(3)$$

В (3) – модуль Юнга при комнатной температуре, – при температуре плавления, – коэффициент Пуассона при комнатной температуре.

$$E(x, y, z, t) = E_p - (E_p - E_0)\theta(x, y, z, t),$$

$$v(x, y, z, t) = 0.5 - (0.5 - v_0)\theta(x, y, z, t), \quad (3)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad \theta = (T_p - T)(T_p - T_0)^{-1}.$$

В (3) E_0 – модуль Юнга при комнатной температуре T_0 , E_p – при температуре плавления T_p , ν_0 – коэффициент Пуассона при комнатной температуре.

Когда напряженное состояние достигнет поверхности нагружения в пространстве напряжений $f(\sigma_{ij}, \sigma)$ функция деформационного упрочнения) необратимые деформации начинают расти. Запишем ассоциированный закон пластического течения

$$\epsilon_{ij}^p = dp_{ij} = \alpha \phi \frac{\partial f(\sigma_{ij}, \eta)}{\partial \sigma_{ij}}, \quad \alpha \phi > 0. \quad (4)$$

В качестве поверхности нагружения примем условие пластического течения Мизеса

$$(\sigma_{ij} - \eta \epsilon_{ij}^p)(\sigma_{ij} - \eta \epsilon_{ij}^p) = k^2 \quad (5)$$

где k – предел текучести, зависящий от температуры $k = k_0 \theta^2$, при $T = T_p$ $k = 0.01$ Па, η – задает вязкие свойства материала [12].

Дополняет систему уравнений (1,2,4,5) уравнение равновесия

$$\sigma_{ij,j} = 0. \quad (6)$$

Граничные условия моделируют свободную поверхность, в качестве начальных условий механической задачи примем температуру пластины в свободном состоянии равной заданной $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

Постановка задачи

Рассмотрим пластины, изготовленные из стали 30ХГСА с размерами 250×500×h мм, при комнатной температуре. Их соединяют с использованием

автоматического электродугового способа сварки. Перед источником тепла электродуговой сварки, на расстоянии 30 мм проходит с этой же скоростью источник тепла длиной 10 мм и шириной 20 мм (рис.1), который обеспечивает заданную температуру на поверхности пластины под собой. Подогрев осуществляется с обратной стороны от электродуговой сварки. Толщину пластины h принимали равной 6, 8, 10 мм, скорость сварки полагали 20, 25, 30 м/ч.



Рис. 1 Схема нагрева

Разделим поставленную задачу на две: температурную и механическую, и решим их в данной последовательности.

При дуговой сварке процесс распределения тепла в твердом теле описывается нелинейным дифференциальным уравнением теплопроводности с учетом действующего источника тепла:

$$c(T)\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T)\text{grad}T) + q \quad (7)$$

$\lambda(T)$ – теплопроводность $\text{Вт}/(\text{м}^\circ\text{C})$, $c(T)$ – удельная теплоемкость $\text{Дж}/(\text{кг}^\circ\text{C})$, ρ – плотность $\text{кг}/\text{м}^3$, q – объемная плотность мощности источника тепла $\text{Вт}/\text{м}^3$.

Источник тепла моделируем методом с использованием двойного эллипсоида, предложенным Джон А. Голдаком [30]. На рисунке 2 показана форма потока тепла в пластине при сварке.

$$q_s = f_s \frac{6\sqrt{3}Q}{a_s b c \pi^{1.5}} e^{-3\left(\left(\frac{x+v(t-t)}{a_s}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z}{c}\right)^2\right)};$$

$$q_l = f_l \frac{6\sqrt{3}Q}{a_l b c \pi^{1.5}} e^{-3\left(\left(\frac{x+v(t-t)}{a_l}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z}{c}\right)^2\right)}, \quad (8)$$

где Q – эффективная тепловая мощность источника нагрева (для дуговой сварки $Q = \eta \cdot I \cdot U$, Вт), t – время, прошедшее с начала действия источника, с; t – текущее время, с; v – скорость перемещения источника нагрева (скорость сварки), м/с; x, y, z – полуоси эллипсоида в координатных направлениях Ox, Oy, Oz , м; f_s и f_l – коэффициенты,

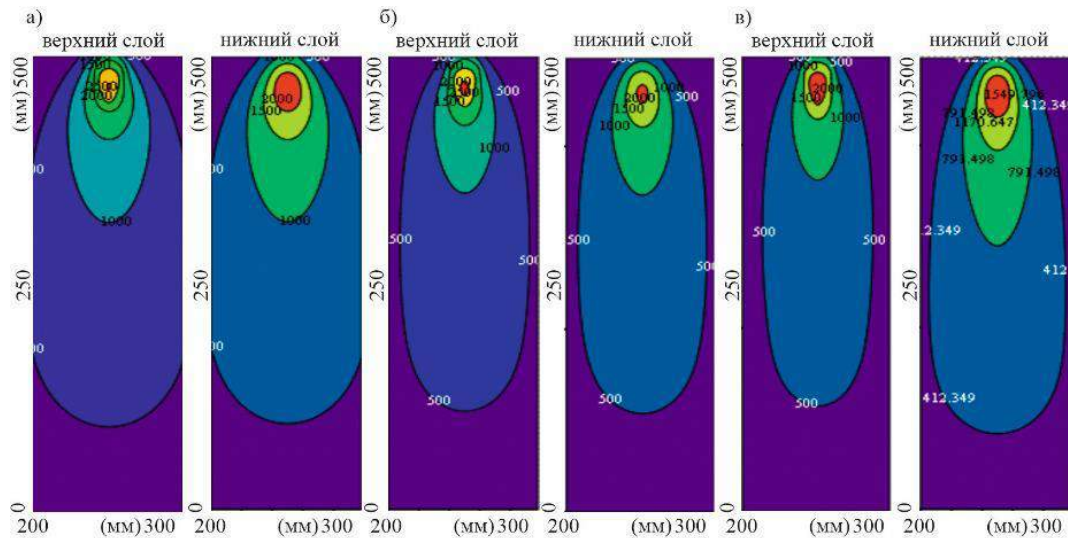


Рис. 4 Распределение температуры в материале пластины толщиной 8 мм в момент отвода источника тепла. а) скорость 20 м/ч; б) скорость 25 м/ч; в) скорость 30 м/ч;

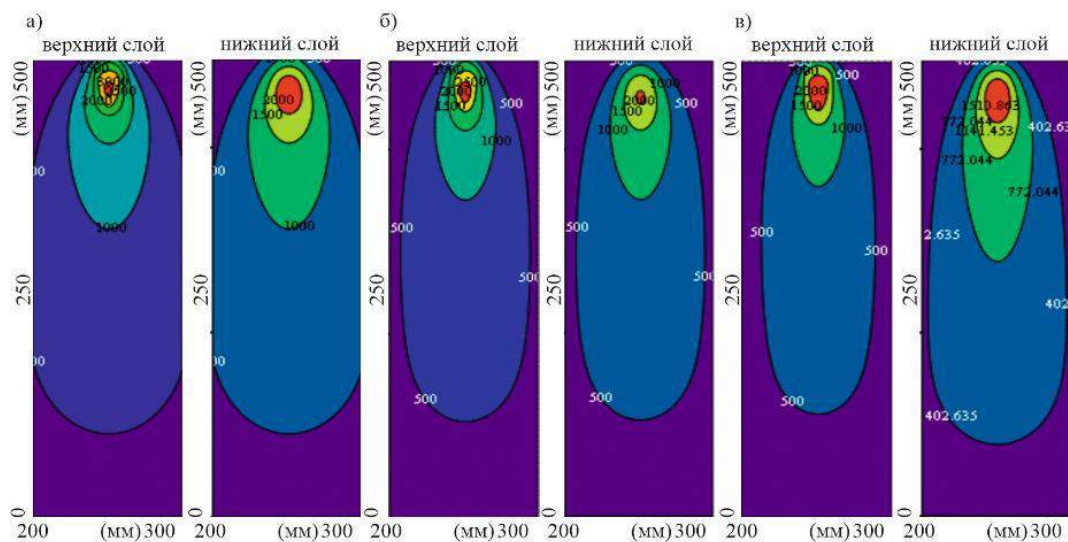


Рис. 5 Распределение температуры в материале пластины толщиной 10 мм в момент отвода источника тепла. а) скорость 20 м/ч; б) скорость 25 м/ч; в) скорость 30 м/ч;

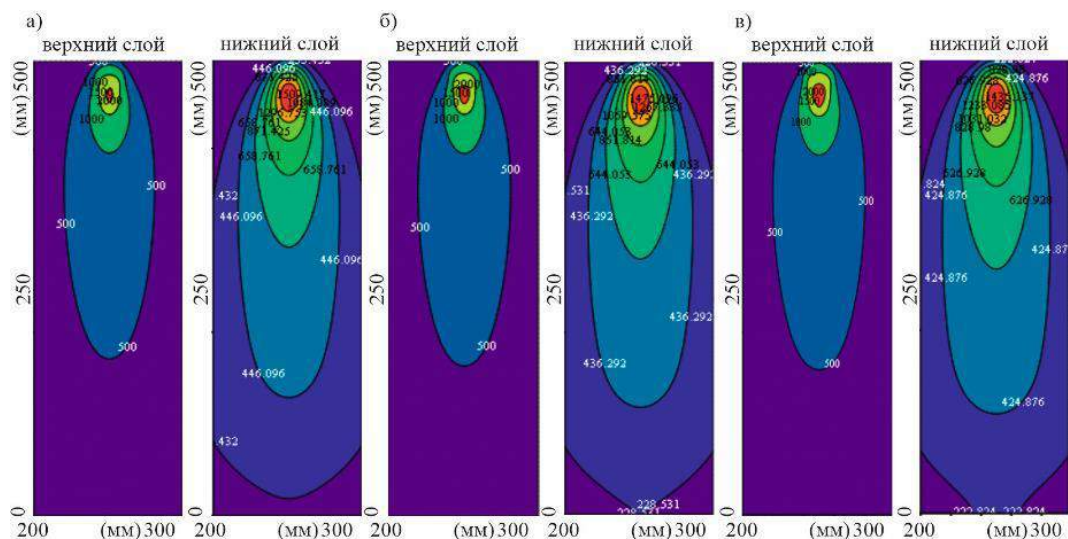


Рис. 6 Распределение температуры в материале пластины толщиной: (а) 6 мм; (б) 8 мм; (в) 10 мм в момент отвода источника тепла, который проходил со скоростью 30 м/ч, без предварительного подогрева.

Остаточные напряжения.

По найденному распределению тепла рассчитывается распределение напряжений с начала сварки до полного остывания пластины. Температура T , перемещения u_x , u_y , u_z , упругие модули λ , μ , K , напряжения σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , σ_{xy} , σ_{yz} , σ_{xz} , необратимая деформация p_{xx} , p_{yy} , p_{zz} , p_{xy} , p_{yz} , p_{xz} все это функции от места и времени, связывает их закон Дюамеля-Неймана:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= (\lambda + 2\mu)(u_{x,x} - p_{xx}) + \\ &+ \lambda(u_{y,y} + u_{z,z} - p_{yy} - p_{zz}) - 3\alpha K(T - T_0); \\ \sigma_{yy} &= (\lambda + 2\mu)(u_{y,y} - p_{yy}) + \\ &+ \lambda(u_{x,x} + u_{z,z} - p_{xx} - p_{zz}) - 3\alpha K(T - T_0); \\ \sigma_{zz} &= (\lambda + 2\mu)(u_{z,z} - p_{zz}) + \\ &+ \lambda(u_{x,x} + u_{y,y} - p_{xx} - p_{yy}) - 3\alpha K(T - T_0); \\ \sigma_{xz} &= \mu(u_{x,z} + u_{z,x}) - 2\mu p_{xz}; \\ \sigma_{yz} &= \mu(u_{y,z} + u_{z,y}) - 2\mu p_{yz}; \\ \sigma_{xy} &= \mu(u_{y,x} + u_{x,y}) - 2\mu p_{xy}; \end{aligned} \quad (10)$$

Уравнение равновесия (6) в декартовой системе координат принимает вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx,x} + \sigma_{xy,y} + \sigma_{xz,z} &= 0, \\ \sigma_{yx,x} + \sigma_{yy,y} + \sigma_{yz,z} &= 0, \\ \sigma_{zx,x} + \sigma_{zy,y} + \sigma_{zz,z} &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Первоначально с развитием процесса деформирования пластические деформации в материале пластины отсутствуют и (10) компоненты тензора пластических деформаций следует положить равными нулю. Они развиваются только при достижении напряжениями поверхности нагружения (5), то есть при выполнении условия

$$\sqrt{\frac{3}{2}((\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2))} = k \quad (12)$$

Соотношение (12) служит начальным условием для дальнейшего роста пластических деформаций в развивающейся области пластического течения. В данной области вязкопластического течения из (5) следуют зависимости, задающие скорости пластических деформаций.

$$\varepsilon_{ij}^p = \frac{1}{\eta} \frac{\Sigma - k}{\Sigma} \tau_{ij}; \quad d\zeta = \frac{1}{\eta} \left(\frac{\Sigma}{k} - 1 \right) \quad (13)$$

Если считать, что в некоторый текущий момент времени пластические деформации достигли уровня \tilde{p}_{xx} , \tilde{p}_{yy} , \tilde{p}_{zz} , \tilde{p}_{xz} , \tilde{p}_{yz} , \tilde{p}_{xy} , то для их расчета на последующем временном шаге можно использовать зависимости

$$\begin{aligned} p_{xx} &= \varepsilon_{xx}^p dt + \tilde{p}_{xx}, \quad p_{yy} = \varepsilon_{yy}^p dt + \tilde{p}_{yy}, \\ p_{zz} &= \varepsilon_{zz}^p dt + \tilde{p}_{zz}, \quad p_{xy} = 12\varepsilon_{xy} dt + \tilde{p}_{xy}, \\ p_{xz} &= 12\varepsilon_{xz} dt + \tilde{p}_{xz}, \quad p_{yz} = 12\varepsilon_{yz} dt + \tilde{p}_{yz}, \end{aligned}$$

где dt – шаг по времени.

Решение задачи (10, 11, 13) находится путем решения системы уравнений (11), записанной в разностном виде относительно перемещений. Необратимая деформация вычисляется на каждом временном шаге в случае выполнения условия пластического течения. Граничные условия механической задачи моделируют свободную поверхность пластины. Когда температура становится равной начальной, решение прекращается. Напряжения, зависящие непосредственно от накопленных необратимых деформаций в момент полного остывания пластины называются остаточными напряжениями.

Физико-механическим свойствами стали 30 ХГСА: модуль Юнга при комнатной температуре $E_0 = 215$ ГПа, $E_p = 0.3E_0$ при температуре плавления $T_p = 1400^\circ\text{C}$, коэффициент Пуассона 0.27, коэффициент линейного расширения $11.7 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, предел текучести при комнатной температуре $k_0 = 820$ МПа. В результате численного решения задачи получили, что касательные напряжения на порядок меньше нормальных напряжений, а нормальные напряжения сохраняют свой характер независимо от выбираемой толщины пластины.

На рис. 7-9 продемонстрировано распределение интенсивности остаточных напряжений на поверхностях пластин толщинами 6, 8, 10 мм в зависимости от скорости перемещения источника тепла 20, 25, 30 м/ч. Видно, что независимо от толщины пластины при увеличении скорости снижается интенсивность остаточных напряжений, а при увеличении толщины возрастает интенсивность остаточных напряжений.

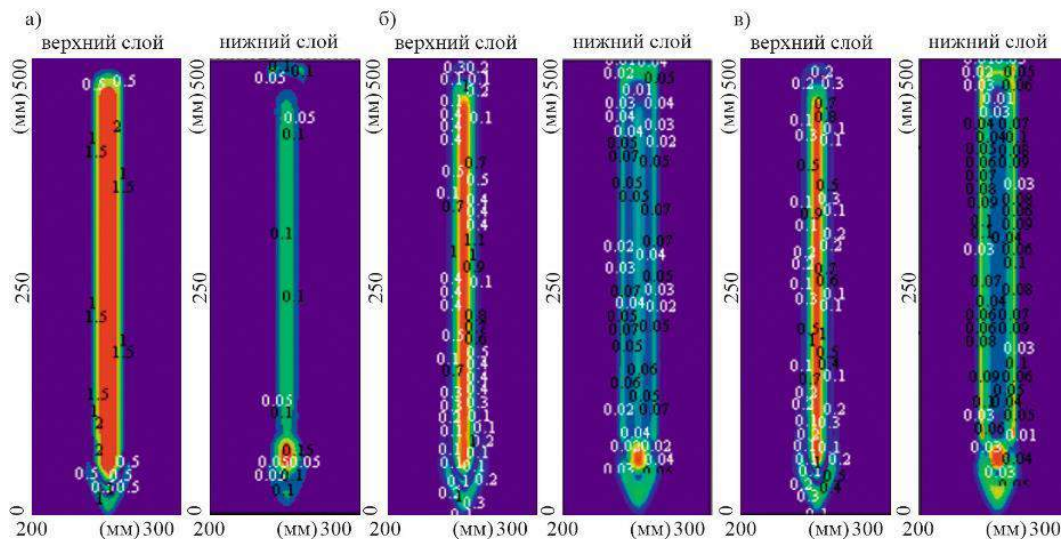


Рис. 7. Распределение интенсивности остаточных напряжений на поверхностях пластины толщиной 6 мм в зависимости от скорости перемещения сварной дуги (а) 20 м/ч; (б) 25 м/ч; (в) 30 м/ч;

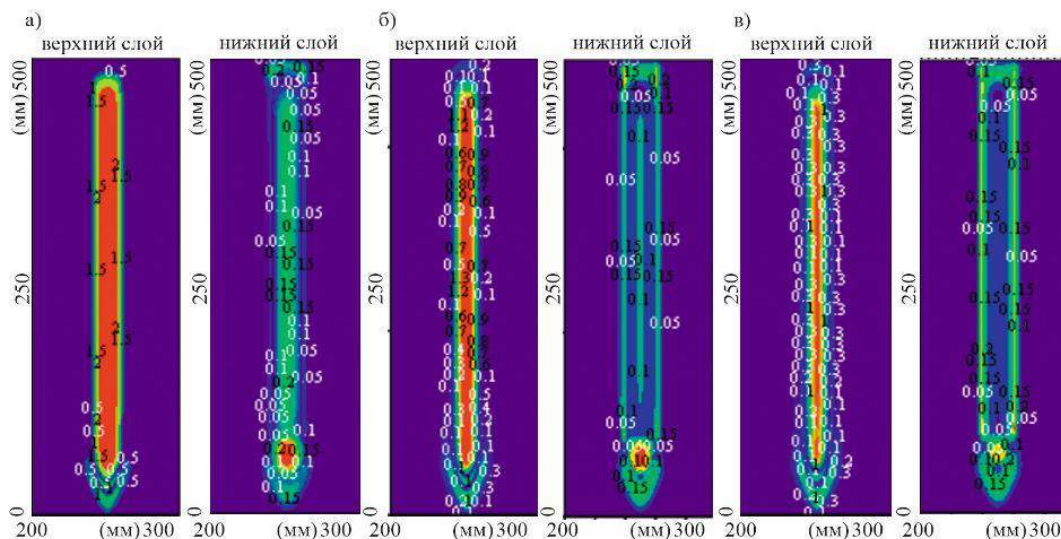


Рис. 8. Распределение интенсивности остаточных напряжений в материале пластины толщиной 8 мм в зависимости от скорости перемещения сварной дуги (а) 20 м/ч; (б) 25 м/ч; (в) 30 м/ч;

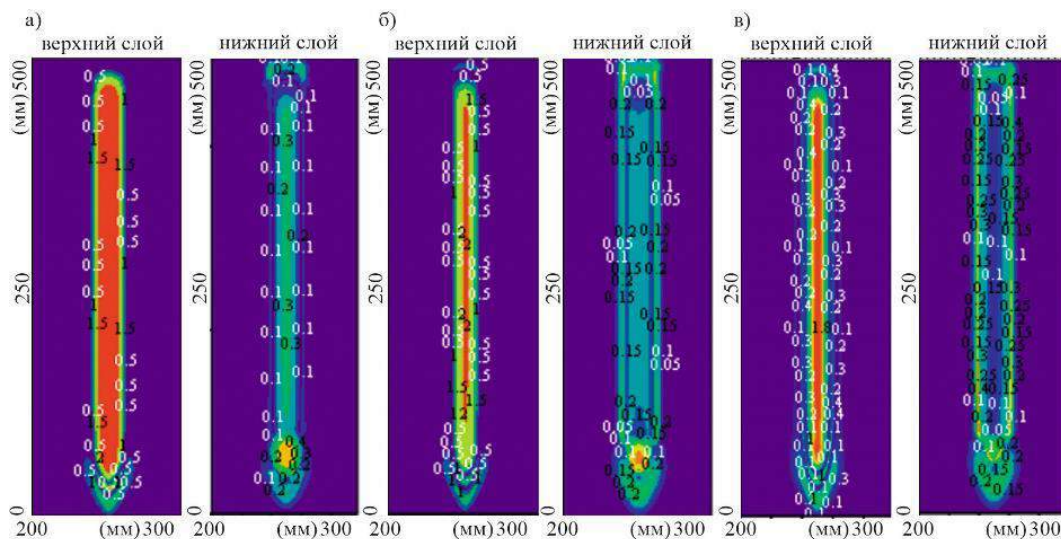


Рис. 9. Распределение интенсивности остаточных напряжений в материале пластины толщиной 10 мм в зависимости от скорости перемещения сварной дуги (а) 20 м/ч; (б) 25 м/ч; (в) 30 м/ч;

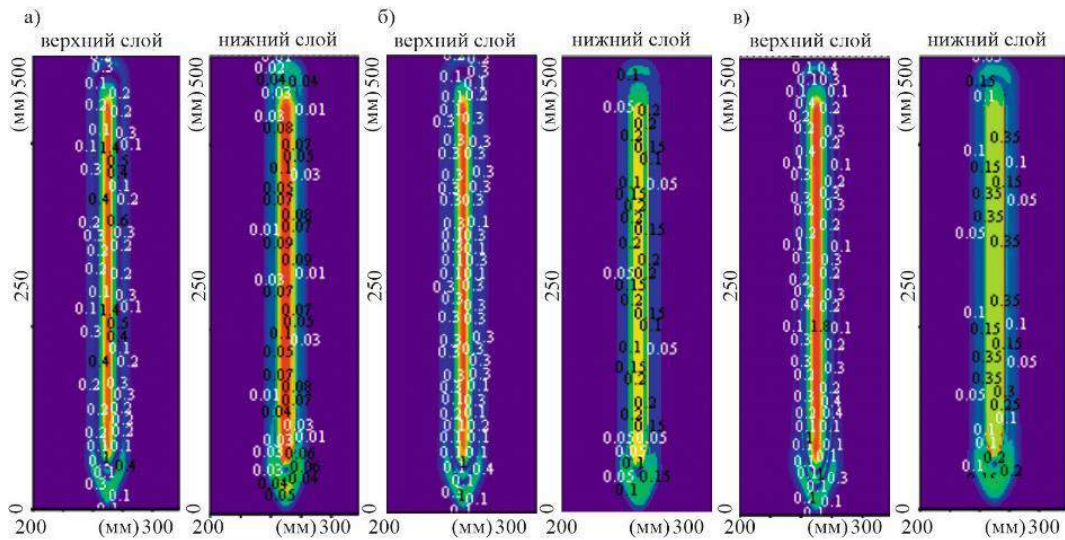


Рис. 10. Распределение интенсивности остаточных напряжений в материале пластины толщиной: (а) 6 мм; (б) 8 мм; (в) 10 мм в момент отвода источника тепла, который проходил со скоростью 30 м/ч, без предварительного подогрева

На рисунке 10 проиллюстрировано распределение интенсивности напряжений в материале пластин толщиной 6, 8, 10 мм в момент отвода источника тепла, который проходил со скоростью 30 м/ч, без предварительного подогрева обратной стороны пластины. Видно, что интенсивность остаточных напряжений в нижнем слое материала пластин выше чем для случаев, когда проходил предварительный прогрев.

Для более подробного доказательства эффективности предварительного обратного

локального подогрева рассмотрим распределение остаточных напряжений σ_{xx}/k_0 в материале пластины толщиной 8 мм при скорости перемещения источников тепла 30 м/ч. Для этого на рисунке 11 приведено распределение остаточных напряжений по толщине пластины, для случаев, когда был предварительный нагрев и без него. Очевидно, что предварительный нагрев кромок пластины уменьшает напряженное состояние в материале пластины по всей ее толщине.

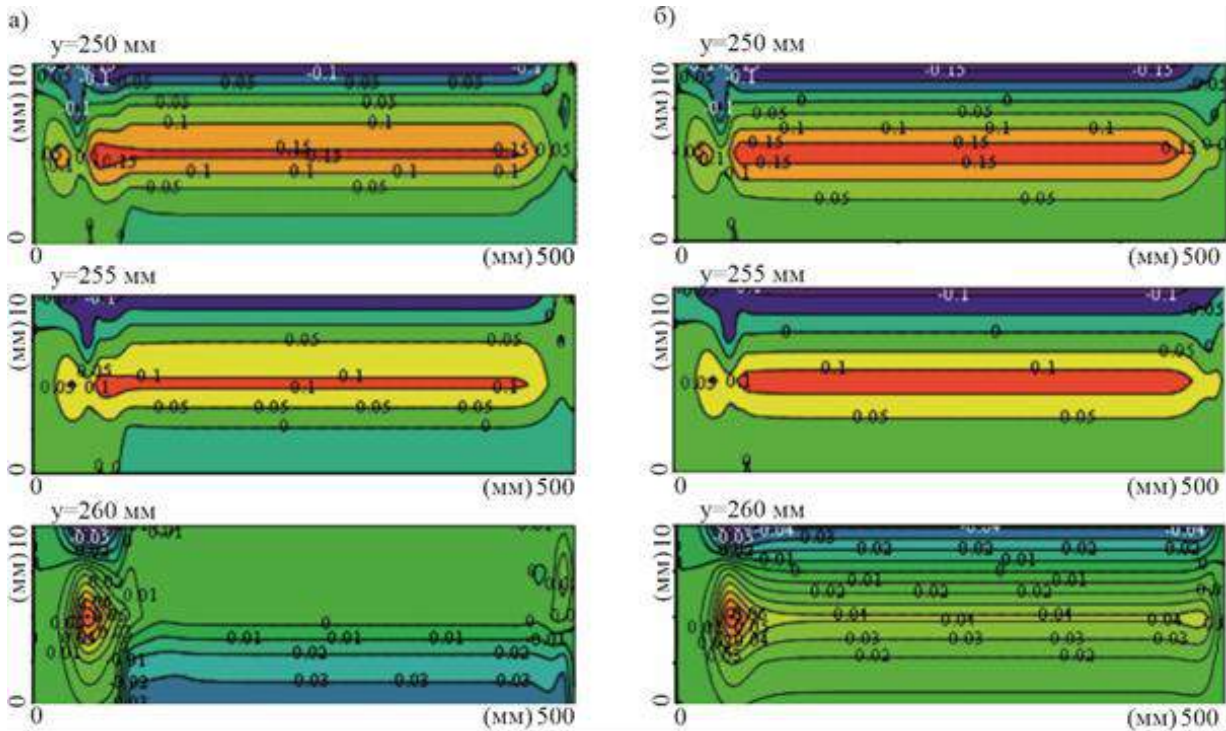


Рис. 11 Распределение остаточных напряжений σ_{xx}/k_0 , образованных в результате электродуговой сварки (а) с предварительным подогревом движущимся источником, (б) без предварительного подогрева.

Заключение

В работе исследован процесс электродуговой сварки стальной пластины, который сопровождался предварительным локальным подогревом кромки пластины с обратной стороны от сварочной дуги. Было установлено влияние, оказываемое предварительным подогревом на распределение интенсивности остаточных напряжений для пластин различной толщины (6, 8, 10 мм) и для различных скоростей сварки (20, 25, 30 м/ч). Установлено, что при увеличении скорости прохождения сварной дуги уменьшается область высокой интенсивности остаточных напряжений, в следствии незначительного понижения температур и

быстротечности процесса, поскольку необратимые деформации не успевают значительно увеличиться. Это справедливо для пластин разной толщины. При увеличении толщины пластины область высокой интенсивности остаточных напряжений увеличивается незначительно.

В результате работы можно сделать следующий вывод: предварительный подогрев кромок пластины с обратной стороны от сварной дуги уменьшает область повышенной интенсивности остаточных напряжений. Формирования сварного соединения эффективнее всего осуществляется при скорости перемещения электрода равной 30 м/ч для представленных толщин пластины.

Литература

1. Venkata KA, Kumar S, Dey HC, Smith DJ, Bouchard PJ, Truman CE. Study on the effect of post weld heat treatment parameters on the relaxation of welding residual stresses in electron beam welded P91 steel plates. *Procedia Eng* 2014; 86 (Grade 91):223–33. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.032>.
2. KunYu, Zhenguo Jiang, Bin Leng, Chaowen Li, Shuangjian Chen, WangTao, Xingtai Zhou, Zhijun Li Effects of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser welds in GH3535 superalloy // *Optics & Laser Technology* 81(2016)18–25 <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.01.029>
3. Jianing Wang, Xin Chen, Lifei Yang, Guanchen Zhang Effect of preheat & post-weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy welded sheets // *Materials Science & Engineering A* 841 (2022) 143081 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143081>
4. E.M El-Banna Effect of preheat on welding of ductile cast iron *Materials Letters Volume 41, Issue 1, October 1999, Pages 20-26* [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(99\)00098-1](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(99)00098-1)
5. American Welding Society. Committee on Definitions and Symbols. *Standard Welding Terms and Definitions: Including Terms for Bazing, Soldering Thermal Spraying and Thermal Cutting*. – American Welding Society, 1985.
6. Sun J, Dilger K, Influence of preheating on residual stresses in ultrahigh strength steel welded components, *Journal of Materials Research and Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.181>.
7. M. Charkhi, D. Akbari Experimental and numerical investigation of the effects of the pre-heating in the modification of residual stresses in the repair welding process *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 171 (2019) 79–91 <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.006>
8. Xiaoxu Li, Shujun Chen, Tao Yuan, Xiaoqing Jiang, Yang Han Improving the properties of friction stir welded 2219-T87 aluminum alloy with GTA offset preheating *Journal of Manufacturing Processes* 51 (2020) 10–18 <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.021>
9. Shude Ji, Zhengwei Li, YueWang, Lin Ma Joint formation and mechanical properties of back heating assisted friction stir welded Ti–6Al–4V alloy. *Materials and Design* 113 (2017) 37–46 <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.10.012>
10. Sanjay Raj, Pankaj Biswas Effect of induction preheating on microstructure and mechanical properties of friction stir welded dissimilar material joints of Inconel 718 and SS316L CIRP. *Journal of Manufacturing Science and Technology* 41 (2023) 160–179 <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.12.014>
11. Chongjing Hu, Lin Chen, Xiong Zhang, Gaoyang Mi, Chunming Wang Effects of preheating-induced interlaminar microstructural evolution on performance of fiber laser welded high strength low alloy steel. *Journal of materials research and technology* 2022 (16) p. 335-346 <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.12.010>
12. Ivan Bunaziv, Geir Langelandsvik, Xiaobo Ren, Ida Westermann, Gisle Rørvik, Cato Dørum, Morten Høgseth Danielsen, Magnus Eriksson Effect of preheating and preplaced filler wire on microstructure and toughness in laser-arc hybrid welding of thick steel *Journal of Manufacturing Processes* 82 (2022) 829–847 <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.08.026>
13. Li Li, Gaoyang Mi, Chunming Wang A comparison between induction pre-heating and induction post-heating of laser-induction hybrid welding on S690QL steel *Journal of Manufacturing Processes* 43 (2019) 276–291 <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.05.003>
14. Prasanta Majumder, Abhijit Sinha, Ajay Biswas Effect of preheating techniques on bead geometry and microhardness of weldment developed through the submerged arc welding process. *Materials Today: Proceedings* 46 (2021) p5001–5007 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.393>
15. Jian Lin, Ninshu Ma, Xin Liu, Yongping Lei Modification of residual stress distribution in welded joint of titanium alloy with multi electron beam heating *Journal of Materials Processing Tech.* 278 (2020) 116504 <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116504>
16. Saurav Suman, Pankaj Biswas, Suraj Baranwal, Vinay Mekala Finite Element Modelling of side heating for mitigation of residual stress and distortion in SAW welded P91 steel weld *Materials Today: Proceedings* 28 (2020) 2511–2521 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.004>
17. Saurav Suman, Pankaj Biswas Comparative study on SAW welding induced distortion and residual stresses of CSEF steel considering solid state phase transformation and preheating *Journal of Manufacturing Processes* 51 (2020) 19–30 <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.012>

18. Wei Zhang, Hang Fu, Jikang Fan, Renjie Li, Haiying Xu, Fangjun Liu, Bojin Qi Influence of multi-beam preheating temperature and stress on the buckling distortion in electron beam welding *Materials & Design* Volume 139, 5 February 2018, Pages 439-446 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.016>
19. Chenxiao Zhu, Xinhua Tang, Yuan He, Fenggui Lu, Haichao Cui Effect of preheating on the defects and microstructure in NG-GMA welding of 5083 Al-alloy *Journal of Materials Processing Technology* Volume 251, January 2018, Pages 214-224 <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.037>
20. Y.C. Lin, K.H.Lee Effect of preheating on the residual stress in type 304 stainless steel weldment *Journal of Materials Processing Technology* Volume 63, Issues 1–3, January 1997, Pages 797-801 [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02727-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02727-6)
21. Ткачева А.В., Абашкин Е.Е. Влияние, оказываемое активным охлаждением на неразъемное соединение, образованное в результате электродуговой сварки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2022. – № 3. – С. 160–169. DOI: 10.15593/pern.mech/2022.3.16
22. Ткачева А.В., Абашкин Е.Е. Влияние предварительного подогрева пластины на значения и распределение остаточных напряжений, образованных в результате наплавки, *Морские интеллектуальные технологии*. 2023. № 2 часть 1, С.304—314. DOI: 10.37220/MIT.2023.60.2.038
23. Lima R. O. C., Jr C. A., Alves de Melo A. C., Alves S. M., Araujo Filho L. New technique for deposition and thermochemical treatment of small parts with complex geometry applied to machining inserts // *Journal of materials research and technology*. – 2020. – V. 9. – pp. 15811–15823. doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.047
24. Wang X., Wana J., Wang J., Zhu L., Ruan H. Anomalous sudden drop of temperature-dependent Young's modulus of a plastically deformed duplex stainless steel // *Materials and Design*. – 2019. – V. 181 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108071>
25. H. Xue, D. Liu, R. Ge, Libo Pan, W. Peng The delay loop phenomenon in high temperature elasticity modulus test by in-situ ultrasonic measurements // *Measurement*. – 2020. – V. 160. doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107833
26. Latella B. A., Humphries S. R. Young's modulus of a 2.25 Cr–1Mo steel at elevated temperature *Scripta Materialia*. – 2004. – V. 51. – pp. 635–639. doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.06.028
27. Lindgren L.-E., Back J. G. Elastic properties of ferrite and austenite in low alloy steels versus temperature and alloying // *Material*. – 2019. – V. 5. doi.org/10.1016/j.mtl.2018.100193
28. Rokilan M., Mahendran M. Elevated temperature mechanical properties of cold-rolled steelsheets and cold-formed steel sections // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2020. – V. 167. doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105851
29. Буренин А. А. Большие необратимые деформации и упругое последствие / А. А. Буренин, Л. В. Ковтанюк. — Владивосток: Дальнаука, 2013. – 312 с.
30. *Computational Welding Mechanics*. / J. A. Goldak, M. Akhlagi. – New York: Springer Science & Business Media. – 2006. – 322 p.
31. *Промышленные печи. Справочник руководство для расчетов и проектирования*. / Е.И. Казанцев. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.

References

1. Venkata KA, Kumar S, Dey HC, Smith DJ, Bouchard PJ, Truman CE. Study on the effect of post weld heat treatment parameters on the relaxation of welding residual stresses in electron beam welded P91 steel plates. *Procedia Eng* 2014; 86 (Grade 91):223–33. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.032>.
2. KunYu, Zhenguang Jiang, Bin Leng, Chaowen Li, Shuangjian Chen, WangTao, Xingtai Zhou, Zhijun Li Effects of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser welds in GH3535 superalloy // *Optics & Laser Technology* 81(2016)18–25 <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.01.029>
3. Jianing Wang, Xin Chen, Lifei Yang, Guanchen Zhang Effect of preheat & post-weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy welded sheets // *Materials Science & Engineering A* 841 (2022) 143081 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143081>
4. E.M El-Banna Effect of preheat on welding of ductile cast iron *Materials Letters* Volume 41, Issue 1, October 1999, Pages 20-26 [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(99\)00098-1](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(99)00098-1)
5. American Welding Society. Committee on Definitions and Symbols. *Standard Welding Terms and Definitions: Including Terms for Bazing, Soldering Thermal Spraying and Thermal Cutting*. – American Welding Society, 1985.
6. Sun J, Dilger K, Influence of preheating on residual stresses in ultrahigh strength steel welded components, *Journal of Materials Research and Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.181>.
7. M. Charkhi, D. Akbari Experimental and numerical investigation of the effects of the pre-heating in the modification of residual stresses in the repair welding process *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 171 (2019) 79–91 <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.006>
8. Xiaoxu Li, Shujun Chen, Tao Yuan, Xiaoqing Jiang, Yang Han Improving the properties of friction stir welded 2219-T87 aluminum alloy with GTA offset preheating *Journal of Manufacturing Processes* 51 (2020) 10–18 <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.021>
9. Shude Ji, Zhengwei Li, YueWang, Lin Ma Joint formation and mechanical properties of back heating assisted friction stir welded Ti–6Al–4V alloy. *Materials and Design* 113 (2017) 37–46 <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.10.012>
10. Sanjay Raj, Pankaj Biswas Effect of induction preheating on microstructure and mechanical properties of friction stir welded dissimilar material joints of Inconel 718 and SS316L *CIRP. Journal of Manufacturing Science and Technology* 41 (2023) 160–179 <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.12.014>

11. Chongjing Hu, Lin Chen, Xiong Zhang, Gaoyang Mi, Chunming Wang Effects of preheating-induced interlaminar microstructural evolution on performance of fiber laser welded high strength low alloy steel. *Journal of materials research and technology* 2022 (16) p. 335-346 <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.12.010>
12. Ivan Bunaziv, Geir Langelandsvik, Xiaobo Ren, Ida Westermann, Gisle Rørvik, Cato Dørum, Morten Høgseth Danielsen, Magnus Eriksson Effect of preheating and preplaced filler wire on microstructure and toughness in laser-arc hybrid welding of thick steel *Journal of Manufacturing Processes* 82 (2022) 829–847 <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.08.026>
13. Li Li, Gaoyang Mi, Chunming Wang A comparison between induction pre-heating and induction post-heating of laser-induction hybrid welding on S690QL steel *Journal of Manufacturing Processes* 43 (2019) 276–291 <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.05.003>
14. Prasanta Majumder, Abhijit Sinha, Ajay Biswas Effect of preheating techniques on bead geometry and microhardness of weldment developed through the submerged arc welding process. *Materials Today: Proceedings* 46 (2021) p5001–5007 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.393>
15. Jian Lin, Ninshu Ma, Xin Liu, Yongping Lei Modification of residual stress distribution in welded joint of titanium alloy with multi electron beam heating *Journal of Materials Processing Tech.* 278 (2020) 116504 <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116504>
16. Saurav Suman, Pankaj Biswas, Suraj Baranwal, Vinay Mekala Finite Element Modelling of side heating for mitigation of residual stress and distortion in SAW welded P91 steel weld *Materials Today: Proceedings* 28 (2020) 2511–2521 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.004>
17. Saurav Suman, Pankaj Biswas Comparative study on SAW welding induced distortion and residual stresses of CSEF steel considering solid state phase transformation and preheating *Journal of Manufacturing Processes* 51 (2020) 19–30 <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.012>
18. Wei Zhang, Hang Fu, Jikang Fan, Renjie Li, Haiying Xu, Fangjun Liu, Bojin Qi Influence of multi-beam preheating temperature and stress on the buckling distortion in electron beam welding *Materials & Design* Volume 139, 5 February 2018, Pages 439-446 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.016>
19. Chenxiao Zhu, Xinhua Tang, Yuan He, Fenggui Lu, Haichao Cui Effect of preheating on the defects and microstructure in NG-GMA welding of 5083 Al-alloy *Journal of Materials Processing Technology* Volume 251, January 2018, Pages 214-224 <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.037>
20. Y.C. Lin, K.H. Lee Effect of preheating on the residual stress in type 304 stainless steel weldment *Journal of Materials Processing Technology* Volume 63, Issues 1–3, January 1997, Pages 797-801 [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02727-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02727-6)
21. Tkacheva A.V., Abashkin E.E. Influence exerted by active cooling on a one-piece joint formed as a result of electric arc welding // *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics.* - 2022. - No. 3. - P. 160–169. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.16
22. Tkacheva A.V., Abashkin E.E. Influence of plate preheating on the values and distribution of residual stresses formed as a result of surfacing, *Marine Intelligent Technologies.* 2023. No. 2 part 1, pp. 304-314. DOI: 10.37220/MIT.2023.60.2.038
23. Lima R. O. C., Jr C. A., Alves de Melo A. C., Alves S. M., Araujo Filho L. New technique for deposition and thermochemical treatment of small parts with complex geometry applied to machining inserts // *Journal of materials research and technology.* – 2020. – V. 9. – pp. 15811–15823. doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.047
24. Wang X., Wana J., Wang J., Zhu L., Ruan H. Anomalous sudden drop of temperature-dependent Young's modulus of a plastically deformed duplex stainless steel // *Materials and Design.* – 2019. – V. 181 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108071>
25. H. Xue, D. Liu, R. Ge, Libo Pan, W. Peng The delay loop phenomenon in high temperature elasticity modulus test by in-situ ultrasonic measurements // *Measurement.* – 2020. – V. 160. doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107833
26. Latella B. A., Humphries S. R. Young's modulus of a 2.25 Cr–1Mo steel at elevated temperature *Scripta Materialia.* – 2004. – V. 51. – pp. 635–639. doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.06.028
27. Lindgren L.-E., Back J. G. Elastic properties of ferrite and austenite in low alloy steels versus temperature and alloying // *Material.* – 2019. – V. 5. doi.org/10.1016/10.1016/j.mtla.2018.100193
28. Rokilan M., Mahendran M. Elevated temperature mechanical properties of cold-rolled steelsheets and cold-formed steel sections // *Journal of Constructional Steel Research.* – 2020.– V. 167. doi.org/10.1016/10.1016/j.jcsr.2019.105851
29. Burenin A. A. Large irreversible deformations and elastic aftereffect / A. A. Burenin, L. V. Kovtanyuk. - Vladivostok: Dalnauka, 2013. - 312 p.
30. Computational Welding Mechanics. / J. A. Goldak, M. Akhlagi. – New York: Springer Science & Business Media.– 2006. – 322 p.
31. Industrial ovens. Reference guide for calculations and design. / E.I. Kazantsev. - M.: Metallurgy, 1975. - 368 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

Анастасия Валерьевна Ткачева, кандидат физ. – мат. наук, старший научный сотрудник, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, 681005, Комсомольск – на – Амуре, ул. Металлургов, 1, e-mail: 4nansi4@mail.ru

Anastasia Valerievna Tkacheva, Ph.D. (Phys & Math), Senior Researcher, Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, 681005, Komsomolsk - on - Amur, st. Metallurgov, 1, e-mail: 4nansi4@mail.ru

Евгений Евгеньевич Абашкин, кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, 681005, Комсомольск – на – Амуре, ул. Металлургов, 1, e-mail: abashkine@mail.ru

Evgeny E. Abashkin, Ph.D. (Eng), Researcher, Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 681005, Komsomolsk - on - Amur, st. Metallurgov, 1, e-mail: abashkine@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 03.08.2023

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 08.08.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 14.08.2023.

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.020>

Вычисление гидродинамических коэффициентов присоединённых масс и демпфирования при колебаниях шпангоутного контура численными методами

Д.А. Альбаев¹ albaevdaniil@gmail.com, Р.Р. Фахурдинов¹ renat@fakhurdinov.ru¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Данная статья рассматривает определение коэффициентов присоединённых масс и демпфирования при вынужденных колебаниях шпангоутного контура с использованием численных методов. Составлена система уравнений, дополненная краевыми условиями. Выполняется численный расчёт задачи качки в пакете "OpenFOAM" с помощью динамической сетки "OverSet", позволяющей выполнить расчёт сложного движения тела для однофазных и многофазных задач. Метод состоит в создании сетки с граничными условиями, имеющей несколько областей, и получении на её основе необходимого решения с помощью интерполяции. Представлены результаты расчёта гидродинамических коэффициентов с помощью численного метода. Согласованность численного моделирования с экспериментальными результатами подтверждает применимость предложенного метода в случае решения задачи качки. Также на основе методов численного моделирования произведены расчёты и представлены результаты присоединённых масс и демпфирования для горизонтальной, вертикальной и бортовой качки при различных отношениях ширины борта к осадке судна.

Ключевые слова: численные методы, OpenFOAM, присоединённые массы, коэффициенты демпфирования, вынужденные колебания, динамическая сетка.

Для цитирования: Альбаев Д.А., Фахурдинов Р.Р. Вычисление гидродинамических коэффициентов присоединённых масс и демпфирования при колебаниях шпангоутного контура численными методами, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 200—209. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.020

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.020>

Determination of hydrodynamic coefficients of the added masses and damping due to oscillations of the frame contour by computational methods

Danil A. Al'baev¹ albaevdaniil@gmail.com, Renat R. Fakhurdinov¹ renat@fakhurdinov.ru¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The article uses numerical methods to determine the coefficients of the attached masses and damping for forced oscillating motion of the frame contour. A system of equations supplemented by boundary conditions is composed. A numerical calculation of the oscillations is performed in the "OpenFOAM" package using the "OverSet" dynamic mesh, which makes it possible to calculate the complex motion of the object for single-phase and multi-phase problems. The essence of the method is to create a mesh with boundary conditions, which has several areas, and obtain the necessary solution using interpolation based on it. The results of calculating the hydrodynamic coefficients using the numerical method are presented. The consistency of the numerical simulation with the experimental results confirms the proposed method's applicability in solving the ship's oscillating motion problem. Also, based on numerical modeling methods, calculations were made. The results of calculating the attached mass and damping coefficients for rolling and pitching at various ratios of the side width to the ship's draft are shown.

Keywords: computational methods, OpenFoam, added masses, damping coefficients, forces oscillations, dynamic mesh.

For citation: Danil A. Al'baev, Renat R. Fahurdinov, Determination of hydrodynamic coefficients of added masses and damping due to motions of the frame contour by computational methods. 2023. № 3 part 1, P. 200—209. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.020

Введение

На сегодняшний день для определения гидродинамических коэффициентов судна при качке широкое распространение получили методы, основанные на применении потенциальной теории.

Салькаев [3] рассчитал гидродинамические характеристики аналитических контуров Льюиса при различных коэффициентах полноты площади шпангоута, отношений $B/2T$ и частотах колебаний, после чего построил графики вычисленных

коэффициентов присоединённых масс и коэффициентов демпфирования.

В.В. Луговский [1] сформулировал и линеаризовал задачу о вынужденных колебаниях плоского контура с тремя степенями свободы, а также на основании испытаний двух систематических серий, проведенных в опытовом бассейне ЛКИ, предложил номограммы для определения коэффициентов присоединённых масс и демпфирования.

Решение задачи о поперечной качке контура в условиях регулярного волнения с учетом

нелинейных граничных условий на свободной поверхности жидкости и на контуре представлено в работе В.Ю. Семёновой [4].

Однако расчет данных коэффициентов, полученные на основе потенциальной теории имеет погрешность, связанную с зависимостью данных подходов от амплитуды качки. Например, опытами для бортовой качки неоднократно подтверждалось, что линейная зависимость коэффициента демпфирования от амплитуды колебаний ошибочна.

Другим важным направлением исследования характеристик качки являются численные методы, основанные на теории вязкой жидкости (CFD). Преимущество данного подхода по сравнению с потенциальными методами является прямой учет вязкости.

В работе Овчинникова К.Д. [2] приводятся результаты определения присоединенных масс и моментов инерции, а также демпфирующих сил и моментов с использованием численного моделирования методов свободных и вынужденных колебаний в программном комплексе "OpenFOAM".

В кандидатской диссертации Тряскина Н.В. [5] разработана методика проведения численного эксперимента при расчётах гидродинамики объектов на регулярном волнении.

Целями настоящей работы является определение и апробация результатов расчета гидродинамических коэффициентов при вынужденных колебаниях контура с использованием численных методов.

Описание метода

В основе метода лежит система уравнений, основанная на подходе осреднения уравнений Навье-Стокса по Рейнольдсу. Для учёта закона сохранения массы необходимо добавить уравнение неразрывности. Получается система из уравнения движения (плоская задача) и уравнения неразрывности:

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

Вычисление неизвестных осуществляется при помощи установки связи между пульсационными и осреднёнными скоростями в турбулентном потоке. Данную связь устанавливает теория турбулентности, которая основана на различных гипотезах о характере процессов турбулентности.

Применяя гипотезу Буссинеска, имеется одна неизвестная – турбулентная вязкость (ν_t):

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k; \quad (2)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j; \\ 0, & i \neq j. \end{cases}$$

Турбулентная вязкость находится с помощью модели $k - \omega$ SST:

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

Для создания двухфазной жидкости используется метод "Volume of Fluid" (VOF). Это численный метод определения положения свободной поверхности. Положение поверхности определяется процентным отношением жидкости в ячейке с помощью функции α . Если $\alpha = 0$, то в ячейке отсутствует отслеживаемая фаза, в данной задаче – в таком объёме будет находиться воздух. В случае $\alpha = 1$, соответственно, объём полностью заполнен отслеживаемой фазой, водой. При $0 < \alpha < 1$ ячейка – граница раздела сред.

$$\frac{\partial \alpha_m}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \alpha_m}{\partial x_j} = 0. \quad (3)$$

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

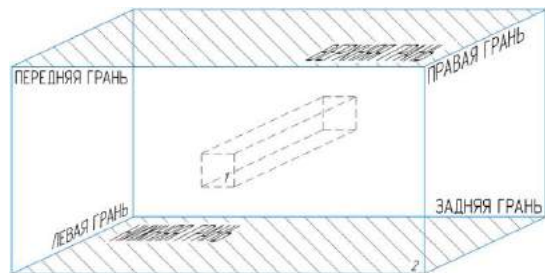


Рис. 12. Схема расчетной области

Условия на гранях расчётной области:
Верхняя грань:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}}{\partial n} = 0, & \int_S \bar{u} dS \geq 0; \\ \bar{u} = 0, & \int_S \bar{u} dS < 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$\bar{p}_0 = \bar{p} - \rho g z = 0;$$

$$\alpha = 0; \quad \frac{\partial k}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial \omega}{\partial n} = 0.$$

Нижняя, левая и правая грани:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial \bar{p}}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial \alpha}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial k}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial \omega}{\partial n} = 0. \quad (5)$$

Расчеты сил произведены с помощью открытого некоммерческого пакета "OpenFOAM".

После расчёта задачи по численному методу имеется ряд чисел – значений сил и моментов в различные мгновения времени. График, построенный по данным числам, представляет из себя сложный сигнал из-за наличия пульсаций. Для нахождения максимальной амплитуды производится дискретное преобразование Фурье (ДПФ), что позволяет представить дискретную периодическую функцию в виде конечного числа частот с определёнными значениями амплитуды и фазы (раскладывает функцию в её спектр). Далее по полученной зависимости находится максимальная амплитуда, которая будет являться максимальной силой за период. Данное значение подставляется в формулы для расчёта коэффициентов демпфирования и присоединённой массы.

Численный эксперимент проводился при колебаниях плоского контура (рис. 2) с геометрией, принятой в соответствии с экспериментом [6].

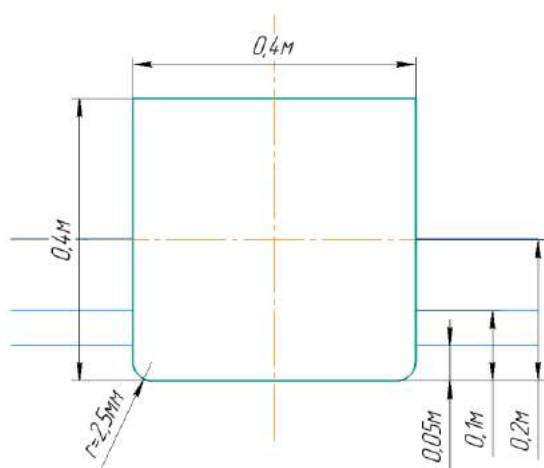


Рис. 13. Плоский контур, использующийся при расчёте

Проведены расчёты трёх видов качки: горизонтальной, вертикальной и бортовой. Рассмотрены восемь различных частот колебаний, близких к частотам эксперимента. Амплитуды колебания: для горизонтальной качки – 0.02 м, для вертикальной качки – 0.02 м, для бортовой – 0.1 рад. Отношение ширины к осадке $B/T = 2, 4, 8$.

Параметры среды: среда двухфазная: фаза №1 (несжимаемая) – жидкость – вода, фаза №2 (несжимаемая) – газ – воздух. Свойства фаз представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Параметры среды		
	Вода	Воздух
Плотность, кг/м ³	998.2	1.225
Кинематическая вязкость, м ² /с	1e-06	1.48e-05

Моделирование численного решения требует оптимальной расчётной области для повторения результатов экспериментального метода, то есть достижения физически точных решений. На основе данных [6] создана расчётная область, повторяющая условия из эксперимента.

Реализация расчёта осуществлена с помощью встроенного в OpenFOAM программного пакета

“OverSet”, позволяющего выполнить расчёт сложного движения тела для однофазных и многофазных задач. Метод состоит в создании сетки с граничными условиями, имеющей несколько областей, и получении на её основе необходимого решения с помощью интерполяции.

В данной работе использована расчётная область, состоящая из двух сеток и трёх зон (рис. интерполируемая (необходима для реализации в “OverSet”); зона 3 – расчётная.

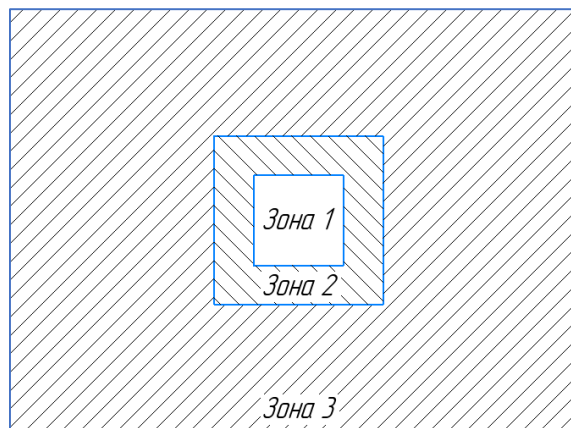


Рис. 14. Расчётная область. Деление на зоны

Для построения расчётной сетки использован штатный для OpenFOAM генератор сеток “blockMesh”. Принцип построения заключается в разложении необходимой для расчёта геометрии на 1 и более трёхмерных шестигранных блоков. Каждый блок определяется 8 вершинами, по одной в каждом углу шестигранника (можно генерировать блоки и с менее, чем 8 вершинами). Ребра могут быть как прямыми линиями, так и дугами, сплайнами. Сама сетка формируется с помощью ввода количества ячеек в каждом направлении блока.

Для корректного учёта влияния свободной поверхности формируется расчётная область, удлинённая по сторонам борта. Как показала практика, оптимальным отношением длины сеточной области к размерам плоского контура является:

$$\frac{1}{10} \approx \frac{B}{L_{sy}}, \quad \frac{1}{5} \approx \frac{H}{L_{sz}} \tag{7}$$

где B – ширина контура, H – высота контура, L_{sy} – длина расчётной области по оси y , L_{sz} – длина расчётной области по оси z .

Определение количества ячеек будет зависеть от размера каждой из ячейки и сгущения сетки. Многочисленные опыты показали, что оптимальным сгущением можно выбрать отношение размеров ячейки к соседней ячейке

$$\frac{l_n}{l_{n+1}} = 1.2, \tag{6}$$

где l_n – длина одной из граней ячейки, l_{n+1} – длина соответствующей грани соседней ячейки.

Сгущение осуществляется в сторону увеличения градиента рассматриваемой величины. Скорость и

давление имеют максимальный градиент вблизи корпуса, расположенного в центре расчётной области. Соответственно, сгущение направлено к середине сетки.

Для определения размера ячейки необходимо провести исследование на сходимость с применением различных значений длины грани клетки сетки (y^+). В рассмотренной задаче принимается оптимальным значение длины по нормали, прилежащей к плоскому контуру, равное 0.01 м.

Учитывая вышесказанное, в работе используется расчётная сетка, состоящая из 9 блоков со сгущением к центру (рис. 4).

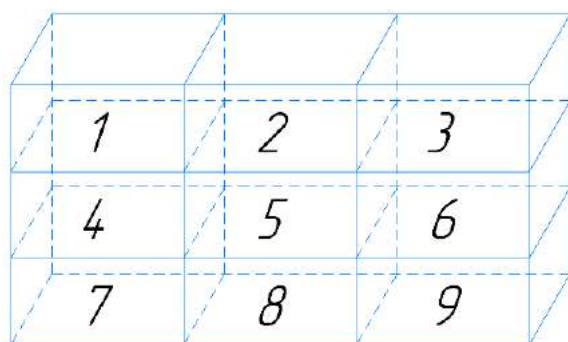


Рис. 15. Блочный вид расчетной сетки

Программный пакет “Overset” предполагает наличие сетки контура для корректной интерполяции. Для снижения схемной диффузии клетки расчётной и интерполируемой сетки примерно одинаковы по размеру. Также снижению ошибки способствует ортогональность к поверхности осей сетки корпуса.

Сетка контура смоделирована с помощью Pointwise – программы для генерации CFD-сеток. Конечная модель сетки объединяет вырезанную и интерполируемую зоны с помощью граничных условий.

Принимается оптимальным значение длины по нормали, прилежащей к плоскому контуру, равное 0.01. Для корректной интерполяции разбиение равномерное, без сгущения.

На рисунках 5 и 6 представлен окончательный вид сетки, используемой при расчётах.

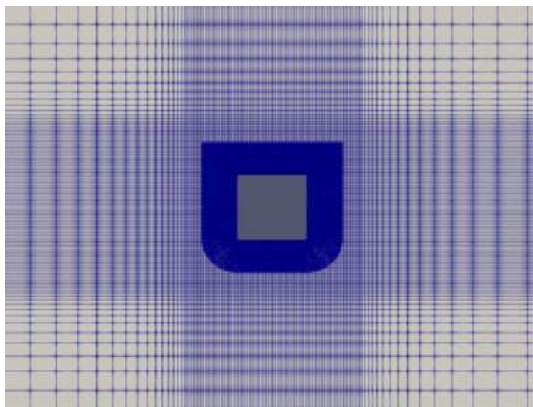


Рис. 16. Вид сетки, используемой при расчётах

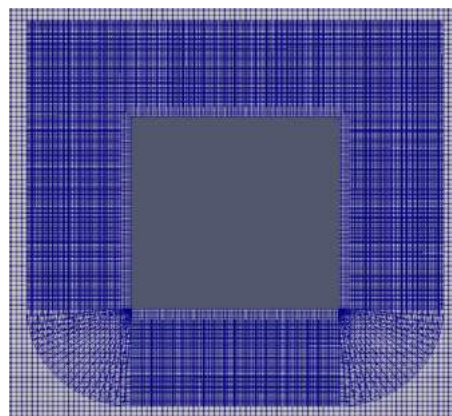


Рис. 17. Вид сетки, используемой при расчётах

Анализ результатов

Расчёт горизонтальной качки был произведён для следующих частот: 0.98, 2.521, 3.502, 4.482, 5.463, 6.443, 7.984, 9.455 1/с. Приведённые частоты аналогичны значениям из экспериментальных данных [6]. Значения сил, получаемые на корпусе, записываются в текстовый файл. По этим данным построены графики. Для каждой частоты был проведен анализ полной горизонтальной силы, состоящей из сравнения исходной силы и обработанной посредством дискретного преобразования Фурье. Зависимости приведены для 4 полных периодов (рис. 7 – 9).



Рис. 18. Сила F_y , действующая на корпус ($\omega = 2.521$)

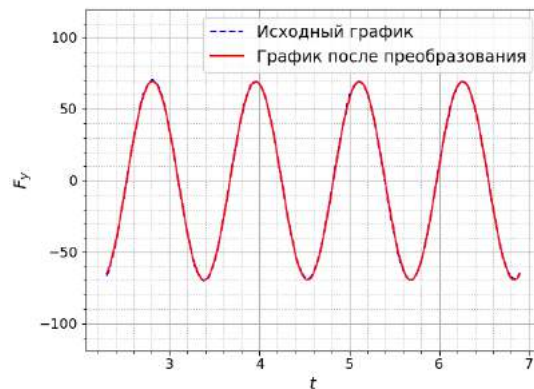


Рис. 19. Сила F_y , действующая на корпус ($\omega = 5.463$)

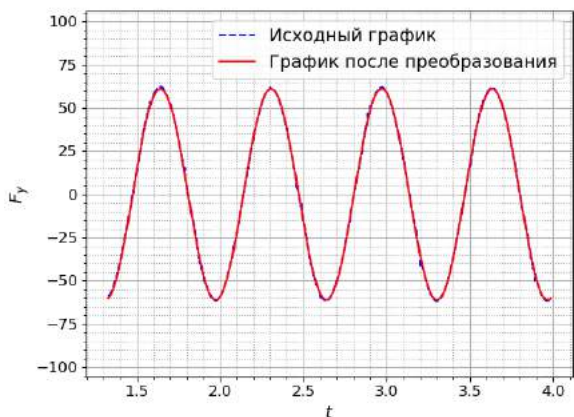


Рис. 20. Сила F_y , действующая на корпус ($\omega = 9.454$)

По полученным амплитудам сил (моментов) можно получить значения коэффициентов присоединённых масс и демпфирования, рассчитав их с помощью формул, описанных для экспериментальных методов, при этом преобразовав их для соответствующего вида колебаний:

$$\lambda_{22}\ddot{y} + \mu_{22}\dot{y} = F_a \sin(\omega t + \varepsilon); \quad (7)$$

$$\begin{aligned} y &= y_A \sin \omega t; \\ \dot{y} &= y_A \omega \cos \omega t; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= -y_A \omega^2 \sin \omega t; \\ -y_A \lambda_{22} \omega^2 \sin \omega t + y_A \mu_{22} \omega \cos \omega t &= \\ &= F_a \cos \varepsilon \sin \omega t + F_a \sin \varepsilon \cos \omega t; \end{aligned} \quad (9)$$

Из (9) при $\omega t = \frac{\pi}{2}$:

$$\lambda_{22} = \frac{F_a \cos \varepsilon}{y_A \omega^2}. \quad (10)$$

При $\omega t = 0$:

$$\mu_{22} = \frac{F_a \sin \varepsilon}{\omega y_A}. \quad (11)$$

В данной работе результаты расчёта гидродинамических сил и значения частот приведены в виде, аналогичной работе Дж. Х. Вугса [6]:

$$\lambda'_{22} = \frac{\lambda_{22}}{\rho A}; \quad (12)$$

$$\mu'_{22} = \frac{\mu_{22}}{\rho A} \sqrt{\frac{B}{2g}}; \quad (13)$$

$$\omega' = \omega \sqrt{\frac{B}{2g}}. \quad (14)$$

По формулам (12), (13) рассчитываются гидродинамические коэффициенты и сравниваются с экспериментом (рис. 10, 11).

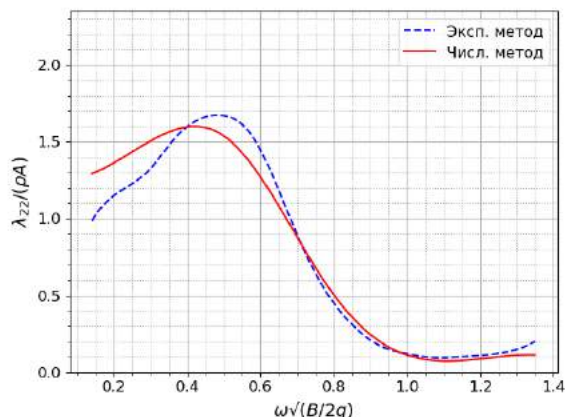


Рис. 21. Сравнение коэффициентов присоединённой массы при поперечных колебаниях

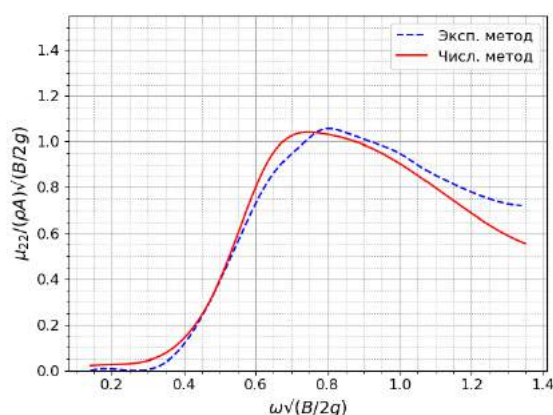


Рис. 22. Сравнение коэффициентов демпфирования при поперечных колебаниях

Как видно из представленных результатов – имеется хорошее как качественное, так и количественное совпадение результатов численного моделирования и эксперимента. Данная апробация расчета характеристик горизонтальных колебаний контура дает возможность рассчитать коэффициента присоединённых масс и демпфирования при различных значения B/T . Результаты данных расчетов представлены на рисунках 12 и 13.

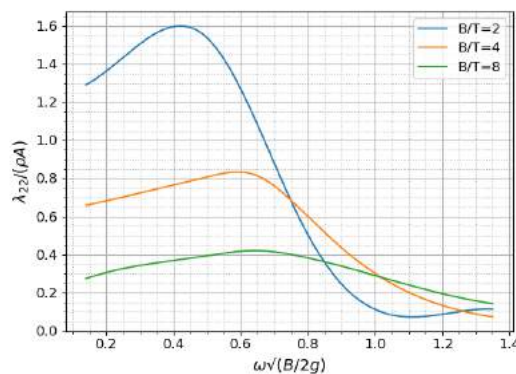


Рис. 23. Сравнение коэффициентов присоединённых масс при разных B/T

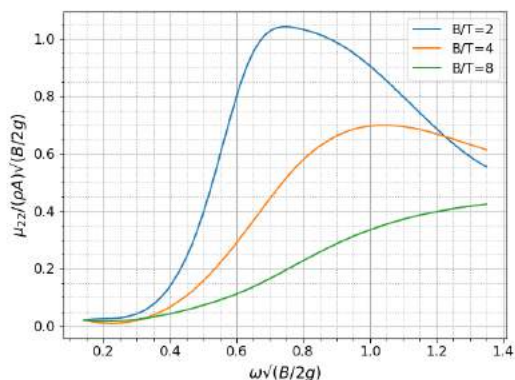


Рис. 24. Сравнение коэффициентов демпфирования при разных B/T

Из рисунков 12 видно, что увеличение отношения ширины к осадке ведет к уменьшению безразмерных коэффициентов присоединенных масс при $\omega\sqrt{B/2g} < 0.7$. Также происходит уменьшение безразмерных коэффициентов демпфирования при $0.3 < \omega\sqrt{B/2g} < 1.1$.

Расчёт вертикальной качки был произведён для следующих частот: 1.989, 2.984, 3.950, 4.924, 7.004, 8.895 1/с. На рисунках 14 – 16 представлены результаты расчетов вертикальной силы полученный численно и с преобразованием Фурье.

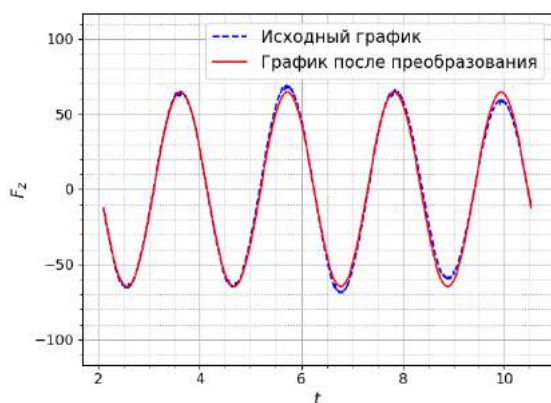


Рис. 25. Сила F_z , действующая на корпус ($\omega = 2.984$)

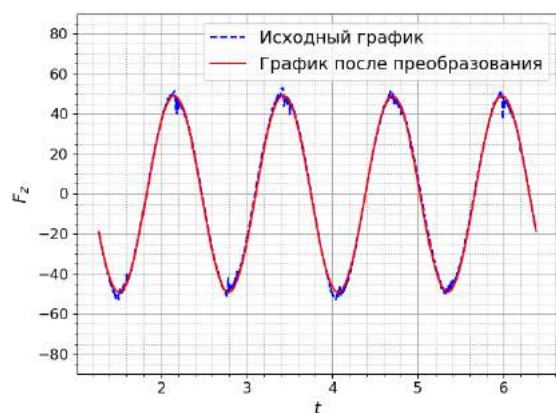


Рис. 26. Сила F_z , действующая на корпус ($\omega = 4.924$)

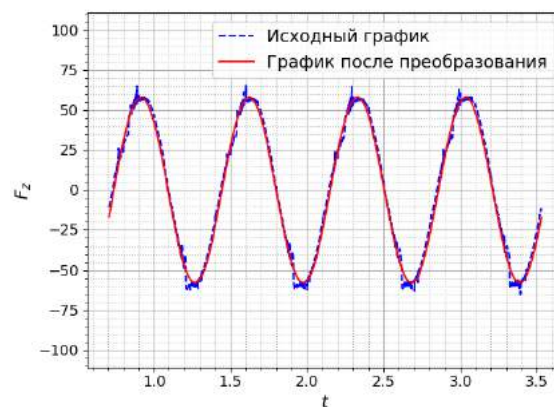


Рис. 27. Сила F_z , действующая на корпус ($\omega = 8.895$)

Вывод коэффициентов присоединённых масс и демпфирования для вертикальной качки:

$$\lambda_{33}\ddot{z} + \mu_{33}\dot{z} + cz = F_a \sin(\omega t + \varepsilon); \quad (15)$$

$$z = z_a \sin \omega t;$$

$$\dot{z} = z_a \omega \cos \omega t; \quad (16)$$

$$\ddot{z} = -z_a \omega^2 \sin \omega t;$$

$$z_a \{-\lambda_{33}\omega^2 + c\} \sin \omega t + z_a \mu_{33}\omega \cos \omega t = F_a \cos \varepsilon \sin \omega t + F_a \sin \varepsilon \cos \omega t. \quad (17)$$

При $\omega t = \frac{\pi}{2}$:

$$\lambda_{33} = \frac{c - \frac{F_a}{z_a} \cos \varepsilon}{\omega^2}. \quad (18)$$

При $\omega t = 0$:

$$\mu_{33} = \frac{\frac{F_a}{z_a} \sin \varepsilon}{\omega}. \quad (19)$$

Из геометрии:

$$c = \rho g \Delta V; \quad (20)$$

где $\Delta V = V(0) - V(z)$.

Безразмерные значения:

$$\lambda'_{33} = \frac{\lambda_{33}}{\rho A}; \quad (21)$$

$$\mu'_{33} = \frac{\mu_{33}}{\rho A} \sqrt{\frac{B}{2g}}. \quad (22)$$

По формулам (21), (22) рассчитываются гидродинамические коэффициенты и сравниваются с экспериментом на рисунках 17 и 19.

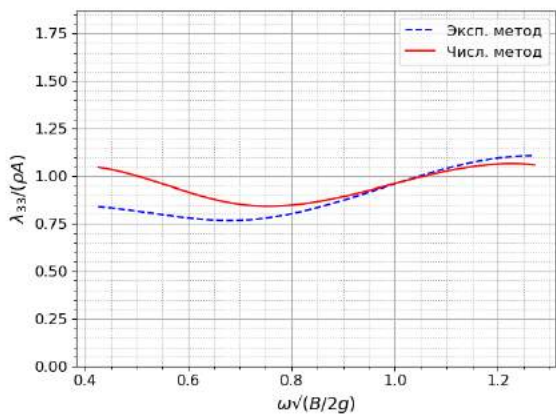


Рис. 28. Сравнение коэффициентов присоединённой массы при вертикальных колебаниях

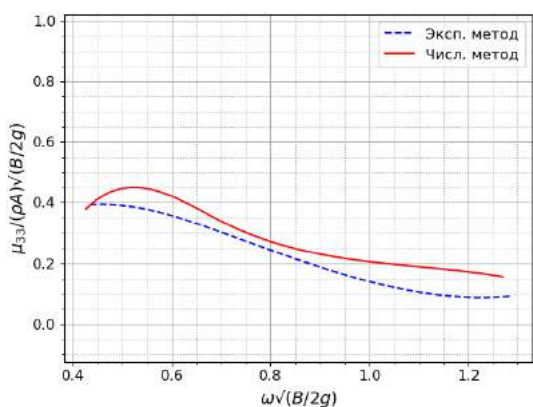


Рис. 29. Сравнение коэффициентов демпфирования при вертикальных колебаниях

На представленных рисунках выше наблюдается хорошее качественное совпадение (с небольшим количественным расхождением) результатов расчета с экспериментом.

Ниже на рисунках 19 и 20 ниже приведены результаты расчетов коэффициентов при различных B/T .

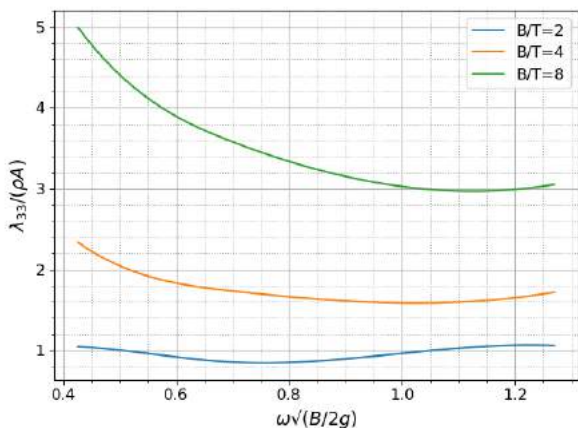


Рис. 30. Сравнение коэффициентов присоединённых масс при разных B/T

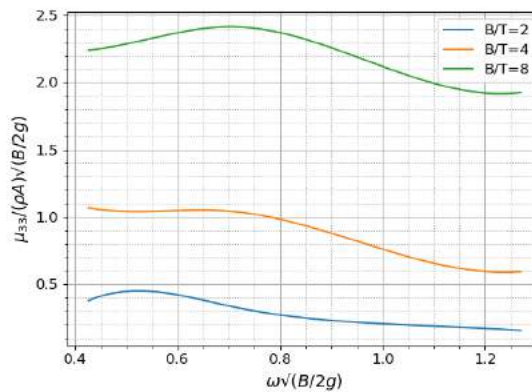


Рис. 31. Сравнение коэффициентов демпфирования при разных B/T

Увеличение B/T при вертикальных колебаниях ведет к увеличению коэффициентов присоединенных масс и демпфирования на всем диапазоне частот (рис. 19, 20).

Расчёт бортовой качки был произведён для следующих частот: 1.023, 1.534, 3.029, 4.027, 5.043, 6.513, 8.019, 12.011 1/с. Для трех частот приведены результаты бортового момента, действующего на корпус, во временной области (рис. 21 – 23).

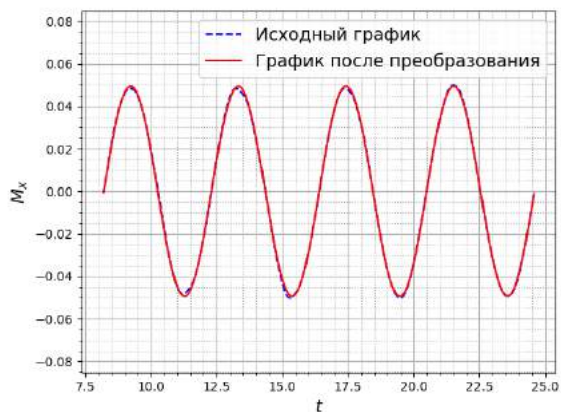


Рис. 32. Момент M_x , действующий на корпус ($\omega = 1.534$)

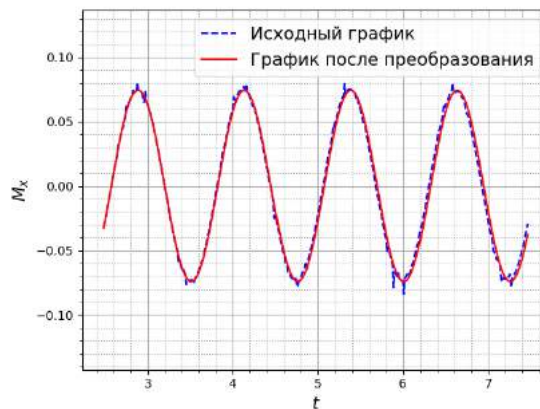


Рис. 33. Момент M_x , действующий на корпус ($\omega = 5.043$)

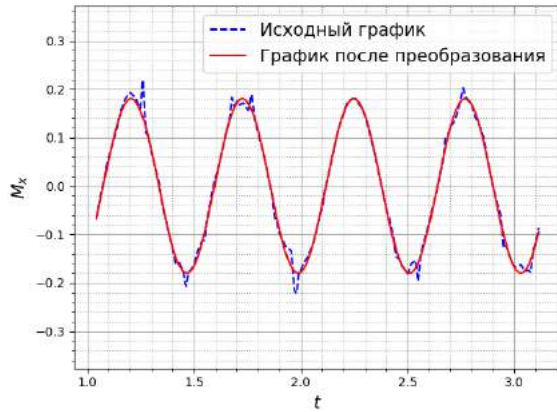


Рис. 34. Момент M_x , действующий на корпус ($\omega = 12.011$)

Вывод коэффициентов присоединённых масс и демпфирования для бортовой качки:

$$\lambda_{44}\ddot{\theta} + \mu_{44}\dot{\theta} + c\theta = M_A \sin(\omega t + \varepsilon); \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_A * \sin \omega t; \\ \dot{\theta} &= \theta_A * \omega * \cos \omega t; \end{aligned} \quad (24)$$

$$\ddot{\theta} = -\theta_A * \omega^2 * \sin \omega t;$$

$$\begin{aligned} \theta_a \{-\lambda_{44}\omega^2 + c\} \sin \omega t + \theta_a \mu_{44} \omega \cos \omega t &= \\ = M_A \cos \varepsilon \sin \omega t + M_A \sin \varepsilon \cos \omega t; \end{aligned} \quad (25)$$

$$c = Dh_0. \quad (26)$$

Из (25) при $\omega t = \frac{\pi}{2}$:

$$\lambda_{44} = \frac{c - \frac{M_A}{\theta_a} \cos \varepsilon}{\omega^2}. \quad (27)$$

При $\omega t = 0$:

$$\mu_{44} = \frac{\frac{M_A}{\theta_a} \sin \varepsilon}{\omega}. \quad (28)$$

Безразмерные значения:

$$\lambda'_{44} = \frac{\lambda_{44}}{\rho AB^2}; \quad (29)$$

$$\mu'_{44} = \frac{\mu_{44}}{\rho AB^2} \sqrt{\frac{B}{2g}}. \quad (30)$$

По формулам (29), (30) рассчитываются гидродинамические коэффициенты и сравниваются с экспериментом на рисунках 24 и 25.

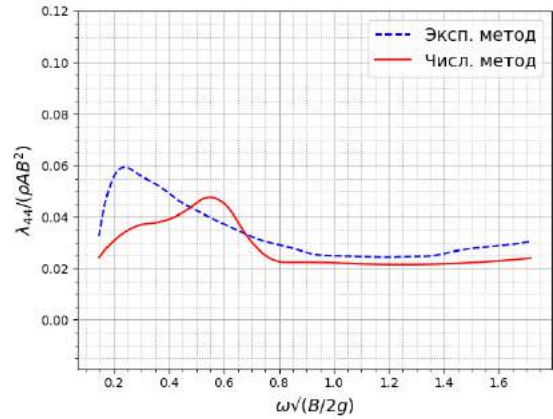


Рис. 35. Сравнение коэффициентов присоединённой массы

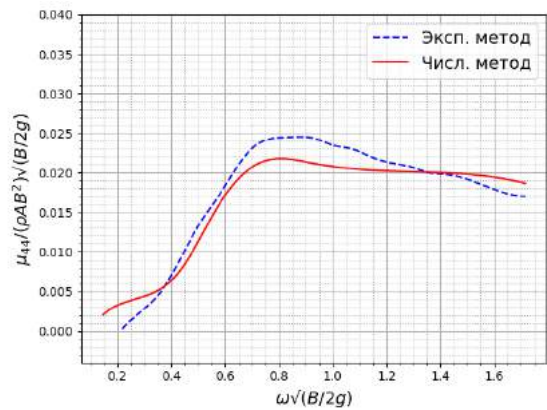


Рис. 36. Сравнение коэффициентов демпфирования

Для коэффициентов присоединённой массы и демпфирования в случае вынужденных бортовых колебаний наблюдается хорошее согласование с экспериментальными данными, как и в случаях горизонтальных и вертикальных колебаний.

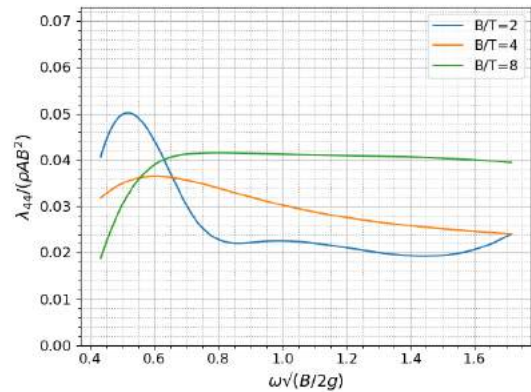


Рис. 37. Сравнение коэффициентов присоединённых масс при разных B/T

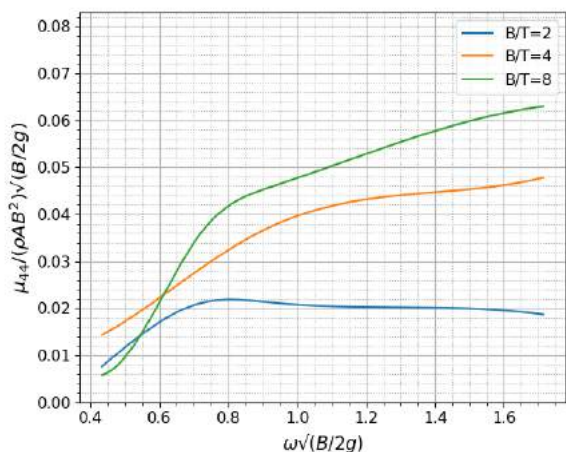


Рис. 38. Сравнение коэффициентов демпфирования при разных B/T

На рисунках 26, 27 представлены графики изменения гидродинамических коэффициентов в зависимости от изменения B/T. Увеличения

отношения ширины к осадке приводит к увеличению коэффициентов в зоне частот $0.7 < \omega$. При этом коэффициент присоединённой массы уменьшается в зоне низких частот.

Заключение

Представлен метод определения гидродинамических коэффициентов с использованием численных методов. Хорошее согласование результатов численного подхода с экспериментальными данными подтверждает применимость численного моделирования в случае решения задачи качки. Применение данного метода дает возможность учета вязкости при определении гидродинамических коэффициентов и уточнения расчетов соответствующих уравнений качки. На основе методов численного моделирования произведены расчёты и представлены результаты присоединённых масс и демпфирования для горизонтальной, вертикальной и бортовой качки при различных отношениях ширины борта к осадке судна.

Литература

1. Луговский В. В. Качка корабля //СПб: СПбГМТУ. – 1999.
2. Овчинников К. Д. Определение гидродинамических характеристик судна при качке с помощью средств вычислительной гидромеханики. Морские интеллектуальные технологии. 2018(1-1):38-42.
3. Салькаев А.З. Гидродинамические силы, действующие на контур произвольной формы, плавающий на поверхности тяжелой жидкости. - Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1967, вып.235.
4. Семенова В.Ю. Исследование и разработка программ расчета нелинейных гидродинамических сил, возникающих при колебаниях контуров корабельной формы на свободной поверхности жидкости. Диссертация на соискание уч. Степени к.т.н. Библиотека СПбГМТУ, 1999г.
5. Тряскин Н.В. Численное моделирование динамики морских объектов на волнении. Диссертация на соискание уч. Степени к.т.н. Библиотека СПбГМТУ, 2018г.
6. Vugts, J.H. "The hydrodynamic coefficients for swaying, heaving and rolling cylinders in a free surface." International shipbuilding progress 15 (1968): 251-276.

References

1. Lugovskij V. V. Kachka korablya //SPb: SPbGMTU. – 1999.
2. Ovchinnikov K.D. Opredelenie gidrodinamicheskikh harakteristik sudna pri kachke s pomoshch'yu sredstv vychislitel'noj gidromekhaniki. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018(1-1):38-42.
3. Sal'kaev A.Z. Gidrodinamicheskie sily, dejstvuyushchie na kontur proizvol'noj formy, plavayushchij na poverhnosti tyazhelej zhidkosti. - Trudy CNII im. akad. A.N. Krylova, 1967, vyp.235.
4. Semenova V.YU. Issledovanie i razrabotka programm rascheta nelinejnyh gidrodinamicheskikh sil, vznikayushchih pri kolebaniyah konturov korabel'noj formy na svobodnoj poverhnosti zhidkosti. Dissertaciya na soiskanie uch. Stepeni k.t.n. Biblioteka SPbGMTU, 1999g.
5. Tryaskin N.V. CHislennoe modelirovanie dinamiki morskikh ob"ektov na volnenii. Dissertaciya na soiskanie uch. Stepeni k.t.n. Biblioteka SPbGMTU, 2018g.
6. Vugts, J.H. "The hydrodynamic coefficients for swaying, heaving and rolling cylinders in a free surface." International shipbuilding progress 15 (1968): 251-276.

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

Данил Айдарович Альбаев, старший преподаватель кафедры теории корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: albaevdaniil@gmail.com

Danil A. Al'baev, senior lecture of department of theory of the ship, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: albaevdaniil@gmail.com

Ренат Румильевич Фахурдинов, студент (магистр) кафедры теории корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: renat@fakhurdinov.ru

Renat R. Fakhurdinov, student (master) of department of theory of the ship, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: renat@fakhurdinov.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 29.05.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 25.07.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 31.07.2023.

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.021>

Исследование волнообразования большегрузного катамарана для внутренних водных путей численными методами

Е.Ю. Чебан¹ egor.cheban.2@gmail.com, Е.А. Лукина¹ evair@yandex.ru, С.Г. Митрошин¹ mitroshin.sg@vsuwt.ru
О.В. Мартемьянова¹ dovnn@yandex.ru, Д.В. Никущенко² Ndmityr@list.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта, ²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация Повышение конкурентоспособности внутреннего водного транспорта возможно за счет увеличения скорости движения большегрузных судов по внутренним водным путям. Для этого необходима постройка судов новых типов, которыми могут стать большегрузные катамаранные паромы. В то же время повышение скорости влечет за собой увеличение высот корабельных волн при движении судна, что в свою очередь отрицательно сказывается как на гидродинамических характеристиках самого судна, так и на экологическом состоянии водных объектов, гидротехнических сооружениях. В настоящей работе представлены результаты исследования процессов волнообразования численными методами в диапазоне числе Фруда от 0,18 до 0,35, который характеризуется большой амплитудой колебаний коэффициентов сопротивления. Волнообразование изучалось для катамаранов длиной 112, 132 и 152 м, при ширине одного корпуса 9 и 10 метров с относительным клиренсом от 0,3 до 0,56. Для исследования использовался программный комплекс NUMECA/FineMarine™. Для верификации результатов численного моделирования по величине коэффициентов сопротивления и форме волновой поверхности использовались работы М.Я. Алферьева, в том числе информация о практическом опыте эксплуатации речных катамаранов типа КТ-619. Полученные результаты позволяют утверждать, что высоты корабельных волн, образующихся при движении катамарана, имеют меньшие высоты, чем волны от однокорпусного судна таких же размеров, а также подтвердились предположения о существовании диапазонов скоростей движения и размеров катамаранов, которые обеспечивают снижение высот волн и коэффициентов сопротивления.

Ключевые слова: большегрузный катамаран, внутренние водные пути, экологический резерв, число Фруда, высота волны, численное моделирование, буксировочные испытания, остаточное сопротивление, NUMECA/FineMarine™.

Благодарности: в основу данной работы положены научные идеи профессора, д.т.н., академика Российской академии транспорта Владимира Львовича Этина (1939 – 2016 г.г.).

Для цитирования: Чебан Е.Ю., Лукина Е.А., Митрошин С.Г., Мартемьянова О.В., Никущенко Д.В. Исследование волнообразования большегрузного катамарана для внутренних водных путей численными методами. Морские интеллектуальные технологии 2023. № 3 часть 2, С. 210—219
DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.021

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.021>

Study of wave formation of a large cargo catamaran for Inland waterways by numerical methods

Egor Yu. Cheban¹ egor.cheban.2@gmail.com, Evgeniya A. Lukina¹ evair@yandex.ru,
Sergey G. Mitroshin¹ mitroshin.sg@vsuwt.ru, Olga V. Martemianova¹ dovnn@yandex.ru,
Dmitry. V. Nikushchenko² Ndmityr@list.ru

¹Volga State University of Water Transport, Russian Federation, ²St. Petersburg state marine technical university Russian Federation

Abstract. Improvement competitiveness of inland water transport can be achieved by increasing the speed of large cargo ships. This requires building new ships types, for example, the large cargo catamaran ferries. From the other hand, an increase in speed entails the growth in the heights of ship waves when the ship, which in turn adversely affects both the hydrodynamic characteristics of the ship itself and the ecological state of water bodies and hydraulic structures. This paper presents the results of studying the processes of wave generation by numerical methods for the Froude numbers from 0.18 to 0.35. This range of the Froude number characterized by a large amplitude of fluctuations in the drag coefficients. Wave generation was studied for catamarans with a length of 112, 132 and 152 m, with a width of one hull of 9 and 10 meters with a relative clearance from 0.3 to 0.56. NUMECA/FineMarine™ software was used. Verification of numerical simulation results was based on the works of M.Ya. Alferyev, including information about practical experience of operating the river KT-619 type catamarans. Comparison of the drag coefficients and the shape of the wave surfaces showed good agreement. The results obtained allow us to assert that the heights of ship waves formed during the movement of a catamaran have lower heights than waves from a single-hull vessel of the same dimensions. The assumptions about the existence of ranges of speeds and dimensions of catamarans, which provide a decrease in wave heights and drag coefficients, were confirmed.

Keywords: CFD, large cargo catamaran, inland waterways, towing test experiment, Froude number, wave height, wave resistance, catamaran's hull interaction

Acknowledgments: This work is based on the scientific ideas of Professor, Dr. Sci. (Eng), Academician of the Russian Academy of Transport Vladimir Lvovich Etin (1939 - 2016).

For citation: Egor Yu. Cheban, Evgeniya A. Lukina, Sergey G. Mitroshin, Olga V. Martemianova, Dmitry. V. Nikushchenko, Study of wave formation of a large cargo catamaran for Inland waterways by numerical methods. Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 1, P. 210—219. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.021

Введение

Одним из способов повышения конкурентоспособности внутреннего водного транспорта может являться создание мультимодальной логистической системы паромно-транспортных перевозок больших количеств грузов с высокой транзитной скоростью [1 - 4].

Выполненные ранее исследования показали, что эксплуатирующиеся в настоящее время на внутренних водных путях (ВВП) суда не позволяют обеспечить эффективную организацию подобных перевозок. В работах [3, 4] было показано, что эксплуатация судов с определёнными грузовыми характеристиками на ВВП должна производиться со скоростью около 30 км/ч. Такие показатели могут обеспечить суда катамаранного типа. При этом следует учесть, что повышение скорости движения водоизмещающих судов неизбежно приводит к увеличению волнового сопротивления и высоты генерируемых корабельных волн.

Экспериментальные и численные исследования [5-7] показывают, что и сопротивление и высоты волн от однокорпусного судна существенно превышают сопротивление и высоты волн катамарана с симметричными корпусами. Это подтверждается и результатами других научных работ [8-9]. Отсюда можно предположить, что большегрузные катамараны могут иметь большую скорость по сравнению с однокорпусными судами близкой грузоподъёмности с точки зрения резерва по волнообразованию.

Один из первых большегрузных речных катамаранов был предложен Г.С. Мадорским в 1960 г. и представлял собой судно г/п 5000 тонн, длиной 118 метров, предназначенное для перевозки плотов и других палубных грузов (рис.1). Развитием этого проекта можно считать прорабатываемый проект катамаранного парома г/п 5000 т. для Волжско-Камского бассейна (рис.2).

Вопросам гидродинамики катамаранов посвящено большое число исследований. Однако в большинстве это работы посвященные либо высокоскоростным морским судам, движущимся при числах Фруда $Fr_L > 0,3$, либо относительно небольшим катамаранам. С точки зрения гидродинамики речных катамаранов длиной от 100 до 150 м. наибольший интерес представляет диапазон чисел Фруда от 0,2 до 0,3, в котором даже небольшие колебания гидродинамических характеристик могут существенно влиять на эксплуатационные параметры судна и всей логистической схемы. Этот диапазон чисел Фруда относится к области докритических скоростей движения речных катамаранов, характеризуется значительной величиной колебаний гидродинамических характеристик, и исследован недостаточно подробно.

Например, по данным М.Я. Алферьева [10-12] (рис. 3) можно видеть, что коэффициент остаточного сопротивления в указанном диапазоне чисел Фруда изменяется на 40%. Графики коэффициентов остаточного и полного сопротивления речных катамаранов [12] имеют большое число локальных экстремумов на участке до $Fr < 0,3$. Это позволяет предположить существенное изменение формы волновой поверхности и параметров волн, генерируемых такими катамаранами.

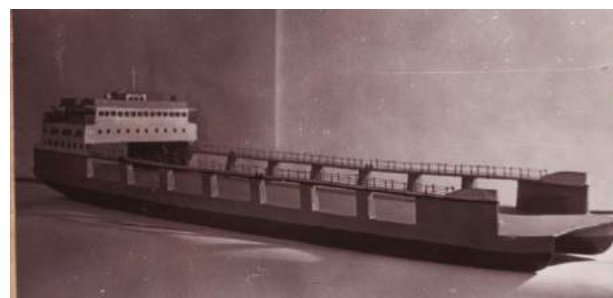


Рис. 1. Катамаранный плотовоз Г.С. Мадорского.



Рис. 2. Перспективный катамаранный паром «Транзит».

Среди работ, посвященных гидродинамике катамаранов судов также можно выделить исследования Костюкова А.А., Ляховицкого А.Г., Дубровского В.Г. [7]. Современные зарубежные исследования характеристик многокорпусных судов посвящены, в основном, высокоскоростным судам. Например, в работе A.F. Molland, P.A.Wilson and D.J.Taunton, (2002) [14] представлены результаты по измерению высот волн, полученные в ходе систематических испытаний в опытовом бассейне катамаранных судов с различными формами носовых оконечностей и длиной цилиндрической вставки в диапазоне чисел Фруда от 0,25 до 1. В исследовании A. Souto-Iglesias R. Zamora-Rodriguez D. Fernandez-Gutierrez L. Perez-Rojas (2007) [15] рассмотрено влияние клиренса на сопротивление и параметры волн, образующихся между корпусами относительно небольших катамаранов, в том числе с учетом дифферента. Wei He и др. в 2015 году выполнили исследование волнообразования катамарана численными методами при $Fr_L > 0,45$ и

показали, что в этом диапазоне катамаран может иметь большее по сравнению с однокорпусным судном, сопротивление, что обусловлено характером взаимодействия волн между корпусами. В работах [15,16] проведены исследования волнообразования при движении катамаранов в диапазоне чисел Фруда 0,1–0,8. Также были проанализированы двумерные волновые поля вокруг моделей на основании буксировочных испытаний и численного моделирования. Показано, что сопротивление катамаранов существенно увеличивается при уменьшении клиренса, влияние которого снижается только при $F_{rL} > 0,7$, а также незначительно при $F_{rL} < 0,3$ в зоне преобладания сопротивления трения в полном сопротивлении. Однако исследования проводились с очень большой дискретностью по числу Фруда и для ограниченных по длине судов.

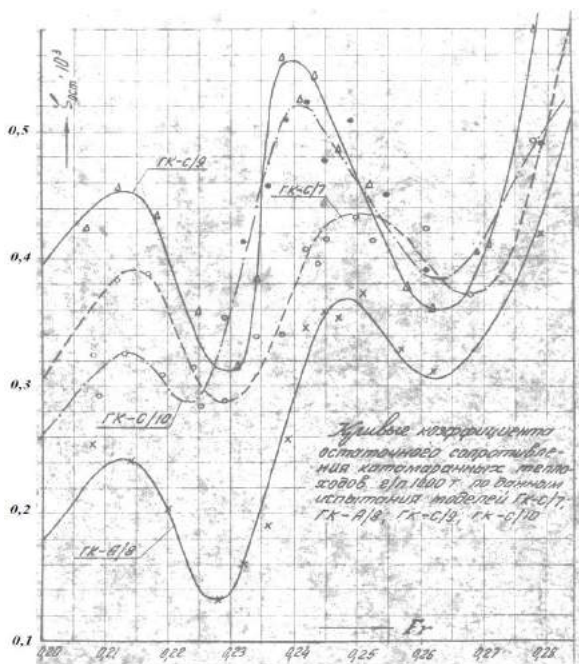


Рис. 3. Графики коэффициентов остаточного сопротивления речных катамаранных судов по данным модельных испытаний М.А. Алферьева

Таким образом, все имеющиеся исследования посвящены высокоскоростным морским катамаранам с меньшими размерениями или выполнены в диапазоне чисел Фруда, не соответствующем скоростям движения большегрузных судов на ВВП. Многие работы посвящены исследованию интерференции волн между корпусами катамарана, но для эксплуатации на ограниченных по габаритам участках ВВП важно также оценить характеристики всех систем волн, генерируемых судном, что немаловажно для оценки возможности разрушения берегов и ложа водоемов, воздействия на прибрежные сооружения в случае высокой интенсивности судоходства.

В связи с этим целью настоящей работы является исследование волнообразования большегрузного катамарана для внутренних водных путей России при скоростях движения, соответствующих $F_{rL} < 0,3$, численными методами.

Обоснование параметров численного моделирования гидродинамики большегрузного катамарана

Для численного моделирования использовался программный комплекс вычислительной гидродинамики NUMECA/FineMarine™. Возможность его использования для определения гидродинамических характеристик судов подтверждается достаточным количеством выполненных ранее исследовательских работ [5,6,19].

Особенностью настоящей работы является необходимость определения не только сопротивления большегрузного катамарана, но и параметров всей системы, генерируемых катамараном корабельных волн. Для верификации постановки задачи было выполнено сравнение результатов численного моделирования и модельных испытаний катамарана КТ-619 [10-12]. Сходимость результатов проверялась по величине сопротивления и по форме волновой поверхности. Использование данного судна для верификации обусловлено наличием большого объема информации, включая задокументированные результаты натурных испытаний и отчеты об опытной эксплуатации. Также стоит отметить, что обводы корпуса перспективного катамарана «Транзит» разработаны с использованием результатов, полученных при исследованиях большого количества вариантов КТ-619.

В соответствии с теоретическими чертежами [10-12] была разработана твердотельная геометрия корпуса КТ-619 в натурную величину и в масштабе модели. Размеры расчетной области и настройки решателя были отработаны в предыдущих исследованиях [5,6,19].

Моделирование выполнялось на четырех вариантах расчетных сеток: 2528122, 4724227, 5005850, 9488080 ячеек с различным измельчением как на поверхности корпуса судна, так и в пограничном слое. При анализе результатов моделирования было отмечено, что в диапазоне чисел Фруда 0,21 – 0,28 изменение u^+ от 1 до 35 и соответственно изменение размеров и количества ячеек сетки в пограничном слое, не оказывает существенного влияния на результаты численного моделирования в FineMarine.

Для более точного построения волновой поверхности, было выполнено локальное измельчение сетки в области возникновения и распространения корабельных волн как вблизи корпуса, так и между корпусами в виде сектора (рис. 4).

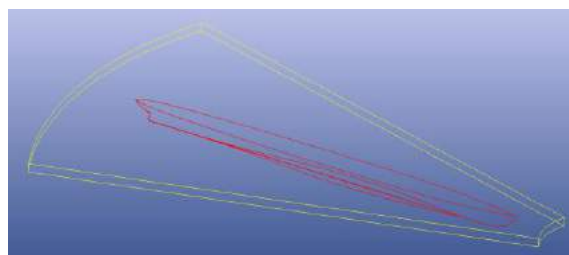


Рис. 4. Область дополнительного измельчения сетки в области волнового клина.

При численном моделировании использовалась «k- ω SST» модель турбулентности [5,6,19]. Также была опробована модель турбулентности «k- ω Wilcox», которая показала более близкие к экспериментальным результатам, что требует дальнейшего исследования.

Сравнение коэффициентов полного сопротивления, графики которых приведены на рис. 5, показывают достаточную сходимость результатов 2...10%. Отличие в коэффициентах сопротивления, по всей видимости, вызвано тем, что буксировочные испытания в опытовом бассейне [10-12] выполнялись на гравитационной системе и допускали изменение посадки модели: появление ходового дифферента и просадки корпуса при движении, что привело к повышению сопротивления.

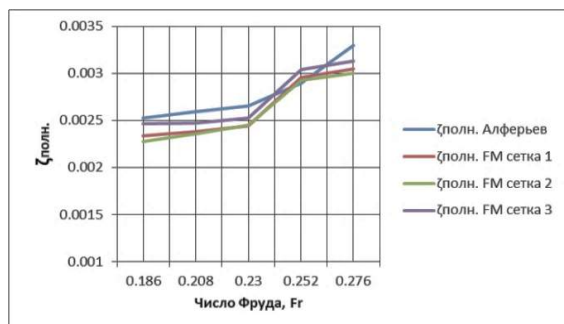


Рис. 5. Сравнение значений коэффициентов полного сопротивления катамарана КТ-619 полученных с помощью NUMECA/FineMarine™, и буксировочных испытаний.

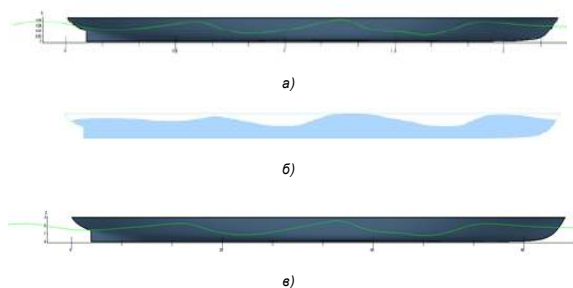


Рис. 6. Волновая поверхность в диаметральной плоскости катамарана при $Fr=0,2705$; а) модель FM; б) модель в опытовом бассейне; в) натура FM.

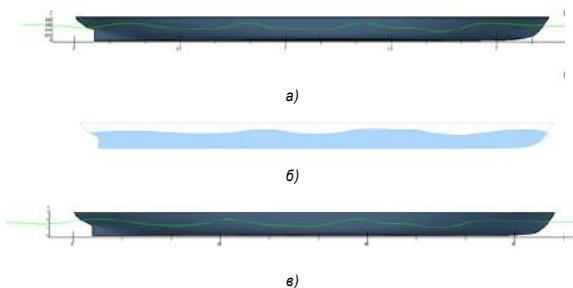


Рис. 7. Волновая поверхность в диаметральной плоскости катамарана при $Fr=0,2355$; а) модель FM; б) модель в опытовом бассейне; в) натура FM.

С изменением посадки модели предположительно связана и некоторая разница в форме волновой поверхности в кормовой части, т.к. при дополнительном погружении корпуса в воду происходит смещение максимумов ординат высот волн, причем в большей степени между корпусами катамарана. Это предположение подтверждается численным моделированием процессов трансформации волн по внутренним бортам многокорпусных судов выполненным в работах [19] также с использованием FineMarine. Исследование влияния дифферента на форму волновой поверхности для речных большегрузных катамаранов будет продолжено в дальнейшем.

Численное моделирование большегрузного катамарана с разной формой внутреннего борта

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

Геометрия корпусов большегрузных катамаранов разрабатывалась на основе типовых обводов катамаранов М.Я. Алферьева, для которых была увеличена длина цилиндрической вставки и полнота кормовой оконечности, что вызвано необходимостью размещения различных помещений именно в корпусе, а не в надстройке.

Для моделирования использовались описанные ранее настройки сетки и решателя [5,6].

Общее количество расчетов составило 222, время одного расчета – от одних до пяти суток.

Таблица 1
Характеристики вариантов большегрузных катамаранов

	Катамаран с симметричными корпусами		Катамаран с плоским внутренним бортом		Однокорпусное судно
	112	132	112	132	
Длина по КВЛ, м	112 132 152				152
Ширина одного корпуса, м	10	9	10	9	28
Осадка по КВЛ, м	2,8		2,8		2,8
Высота борта, м	6		6		6
Относительный клиренс	0,3; 0,35; 0,4; 0,44; 0,5; 0,56				-
Скорость, м/с	7; 7,5; 8,1; 8,6; 9,17; 11,7				

Для исследования процессов интерференции волн между корпусами катамаранов было выполнено сравнение сопротивления и волнообразования катамаранов с симметричными обводами (рис.8) и катамаранов с плоским внутренним бортом (рис.9).

Было проведено контрольное моделирование водоизмещающего судна с геометрическими характеристиками, аналогичными большегрузному катамарану. Для сравнения использовалось однокорпусное судно, размерения которого

соответствовали размерениям катамарана, а обводы получены аффинным преобразованием корпуса теплохода типа «Волго-Дон».

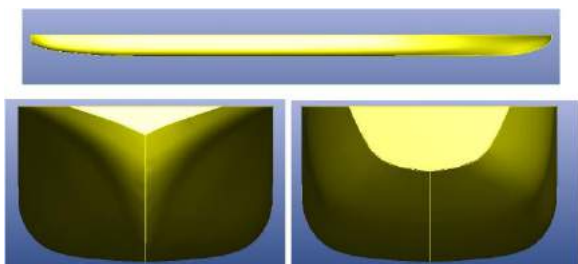


Рис. 8. Симметричный корпус катамарана.

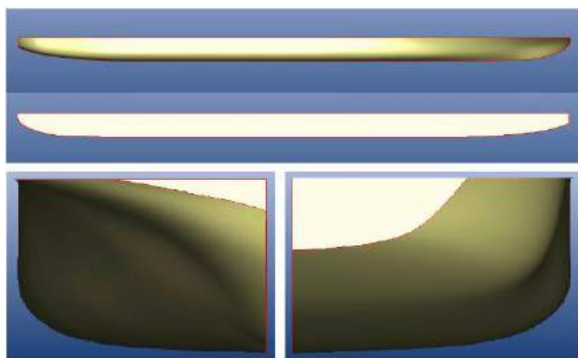


Рис. 9. Корпус катамарана с плоским внутренним бортом.

Результаты и обсуждение

Анализируя графики коэффициентов полного сопротивления для катамаранов различной длины и формы корпуса (рис.10) можно увидеть, что для большегрузных катамаранов характерны особенности кривых, полученных в работах М.Я. Алферьева (рис.3).

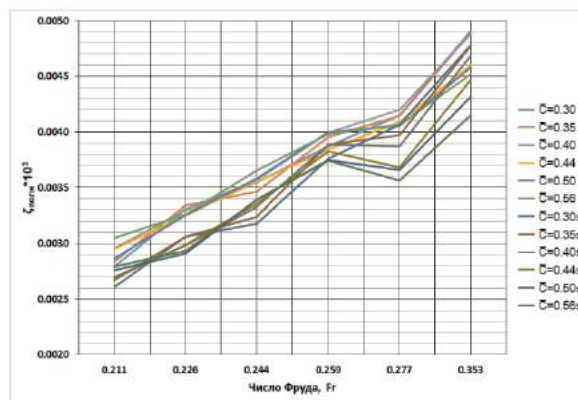
Наблюдается существенный разброс результатов в диапазоне числе Фруда 0,181-0,353, а также локальные минимумы и максимумы кривых. Наибольший разброс коэффициентов сопротивления происходит у катамарана длиной 152 м для обоих типов корпусов. В общем случае сопротивление катамаранов с плоским внутренним бортом оказывается выше, чем с симметричным бортом.

Для судна длиной 112м минимальное значение $\zeta_{полн}$ наблюдается при $F_{rL}=0,277$ и $\bar{C} = 0,56$. На графиках при этом значении числа Фруда наблюдается локальный минимум (кроме $\bar{C} = 0,30$ и $\bar{C} = 0,44$ для плоского борта) (рис.10а). Локальный «горб сопротивления», по всей видимости, для этого варианта катамарана соответствует $F_{rL}=0,259$.

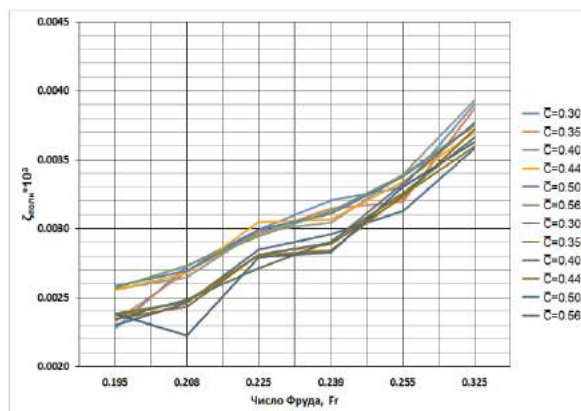
При длине катамарана 132м ярко выраженного «горба сопротивления» не наблюдается, но изломы кривых происходят при $F_{rL}=0,225$ и $F_{rL}=0,239$ (рис. 10б). Для $\bar{C} = 0,30$, $\bar{C} = 0,35$ для плоского борта и $\bar{C} = 0,30s$ для симметричного излом происходит при $F_{rL}=0,255$. Следует отметить резкий минимум на графике для $\bar{C} = 0,50s$ для симметричного корпуса при $F_{rL}=0,208$.

Вариант длины 152 м характеризуется наиболее интенсивным разбросом результатов – локальные экстремумы кривых наблюдаются во всем диапазоне числе Фруда (рис. 10в). Минимальными значениями

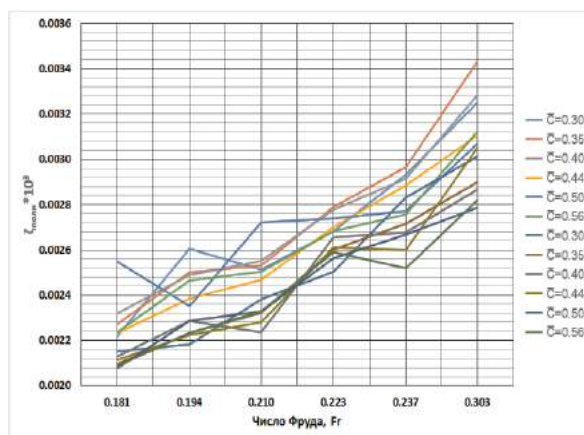
коэффициентов сопротивления обладает катамаран с $\bar{C} = 0,56s$ при симметричных обводах. В то же время интересно поведение кривых, соответствующих $\bar{C} = 0,50$ для плоского борта и $\bar{C} = 0,30s$ для симметричного борта, которые находятся в «противофазе» остальным кривым. Повторные проверочные расчеты подтвердили полученные значения.



а)



б)



в)

Рис. 10. Графики изменения коэффициентов полного сопротивления: а) катамаран $L=112\text{м}$; б) катамаран $L=132\text{м}$; в) катамаран $L=152\text{м}$.

Коэффициент сопротивления для условного однокорпусного судна, соответствующего размерами катамарану, для всех случаев оказывается большим (рис.11).

Особенности изменения коэффициентов сопротивления, по всей видимости, связаны с характером волновых процессов, происходящих при движении катамарана, в первую очередь в междукорпусном пространстве, что соответствует работам [14-20] выполненных для катамаранов других типов и размеров.

Для получения ординат волнового профиля на корпусе судна использовались графики, представленные на рис. 12, позволяющие определить ординату волны в любой точке корпуса судна в отсчёте от основной плоскости.

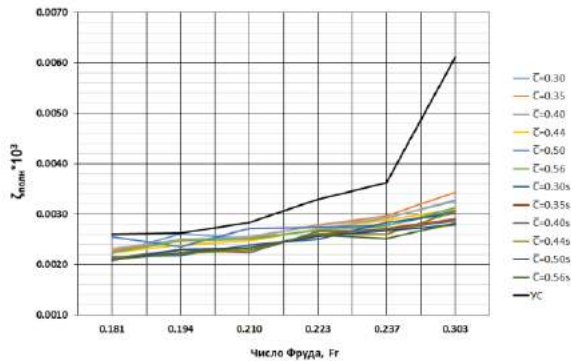


Рис. 11. Сравнение коэффициентов полного сопротивления для катамаранов с различной формой борта и условным однокорпусным судном (УС).

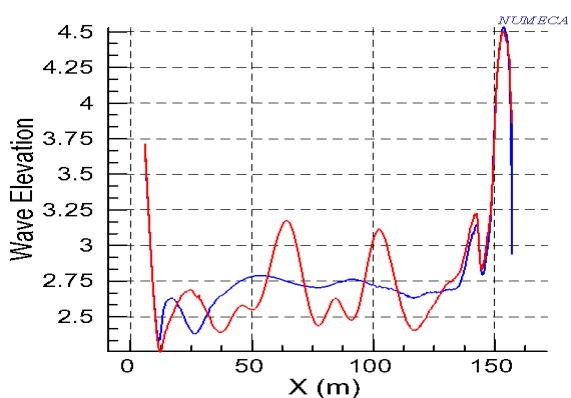


Рис. 12. Пример ординат волнового профиля на корпусах катамарана длиной 152 м, клиренс 8 м, ширина корпуса 10 м при $Fr=0,237$.

По результатам анализа ординат волновых профилей можно сделать следующие выводы и наблюдения.

Для катамарана длиной 112м (плоский внутренний борт) высота волны у наружного борта в носовой части повышается с увеличением скорости движения судна и несущественно зависит от относительного клиренса. Из общей картины выделяются точки с $\bar{C} = 0,44$ при $Fr_L=0,277$.

Для катамарана длиной 112м с симметричными корпусами высота носовой волны у наружного борта зависит от клиренса. При $\bar{C} = 0,3s$ ордината волнового профиля больше, чем для всех остальных случаев, но при $Fr_L=0,277$ наблюдается резкий скачок, после чего рост высот волн ускоряется.

Для судна длиной 132м с плоским внутренним бортом высота волны в носу от клиренса не зависит. Небольшое отличие при $\bar{C} = 0,35$ и $Fr_L=0,255$, после которого рост ускоряется.

У катамарана длиной 132м с симметричными корпусами высота носовой волны увеличивается при повышении скорости, от клиренса зависит слабо. Разница в величине ординат для разных клиренсов достигает только 5 %.

Для катамарана длиной 152 м с обоими типами корпусов высоты носовой волны существенно зависят от клиренса, ускорение роста высот волн происходит при $Fr_L=0,237$. При $\bar{C} = 0,35$ высоты волн до данного значения числа Фруда выше во всем диапазоне.

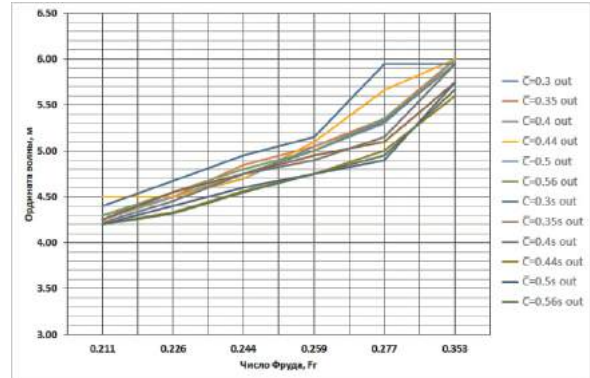


Рис. 13. Максимальные ординаты волнового профиля в носовой части наружного борта катамарана $L=112$ м с симметричными корпусами.

Для катамаранов во всех случаях высота носовых волн оказывается существенно ниже, чем для условного однокорпусного судна – на 10-35% (рис. 14).

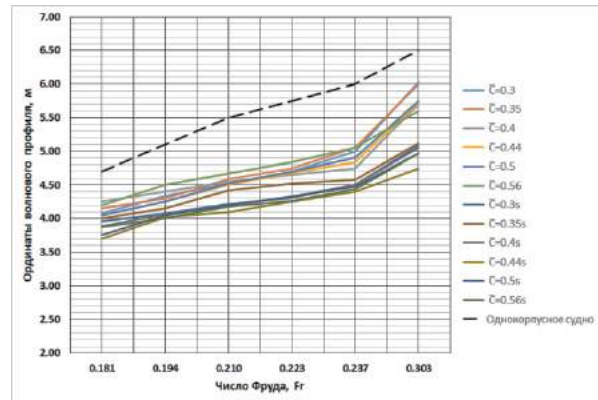


Рис. 14. Сравнение высот волн для условного однокорпусного судна и катамарана при $L=152$ м.

Для катамаранов всех длин максимальные значения высот волн в междукорпусном пространстве наблюдаются в носовой части, хотя, например, для катамарана КТ-619 при повышении числа Фруда максимальные высоты волн смещались к миделю, что согласно отчетам [10-12] приводило к снижению скорости судна.

У катамарана длиной 112м с плоским внутренним бортом ординаты волны оказываются на 15-20% больше, чем у катамарана с симметричными корпусами. Разброс высот увеличивается при максимальном числе Фруда 0,353. При $\bar{C} = 0,35s$ для симметричного корпуса высоты волн в междукорпусном пространстве оказываются выше для всех чисел Фруда.

Для катамарана длиной 132м как для обоих типов корпусов высота волны от клиренса зависит не существенно, рост ординат волнового профиля при увеличении числа Фруда от 0,195 до 0,325 составляет до 25%.

При длине корпуса катамарана 152м появляется зависимость высоты волны от клиренса. Так, если для 112м и 132м графики высот волн четко группируются для плоского и симметричного бортов, то при 152м проявляется существенная разница в высотах волн для разных относительных клиренсов (см. рис. 14). По всей видимости, это происходит из-за процессов трансформации волн между корпусами судна, которые зависят от протяженности междукорпусного пространства. Максимальные значения волн для плоского внутреннего борта наблюдаются при $\bar{C} = 0,56$ и $\bar{C} = 0,4$, минимальные – при $\bar{C} = 0,3$. Разница в высотах волн составляет 27% при числе Фруда 0,303, наибольший разброс высот волн при $\bar{C} = 0,4$, при $Fr_L=0,35; 0,5$ – наименьший.

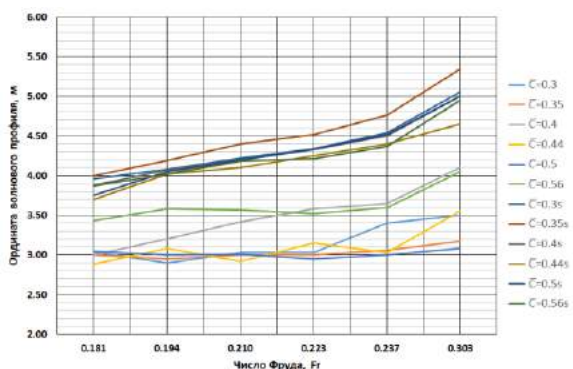


Рис. 15. Ординаты волнового профиля в междукорпусном пространстве катамарана длиной 152 м с разными относительными клиренсами.

Для катамарана длиной 152м при симметричном корпусе минимальные высоты при клиренсе $\bar{C} = 0,44s$, максимальные – при $\bar{C} = 0,35s$. Интенсивность повышения ординат волн происходит после значения числа Фруда 0,237.

Результаты моделирования показывают, что с увеличением длины катамарана высота волны в носовой части междукорпусного пространства понижается, причем это характерно и для плоского и для симметричного корпуса.

Высота кормового буруна повышается с увеличением числа Фруда и уменьшением длины судна (рис. 16), что, по-видимому, связано с гашением волн при многократном отражении от корпусов судна. На рис. 16 видно, что наибольшие значения высот волн наблюдаются у симметричного корпуса длиной 112м, причем высота волн уменьшается с увеличением клиренса, что опять же связано с уменьшением отражения от поверхностей бортов, как это видно из рис. 17.

Для корпусов с плоским внутренним бортом существуют числа Фруда, после которых рост высот кормового буруна ускоряется – 0,277; 0,255; 0,240.

Заключение

Выполнено исследование волнообразования и гидродинамических характеристик большегрузного катамарана для внутренних водных путей с

использованием программного комплекса CFD NUMECA/FineMarine™. Исследованы три варианта длины судна – 112, 132 и 152 м, шесть вариантов относительного клиренса для плоского и симметричного внутреннего борта.

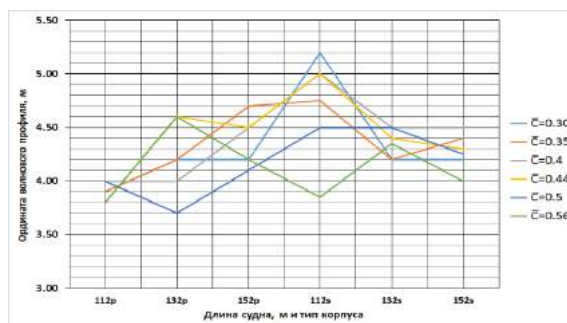
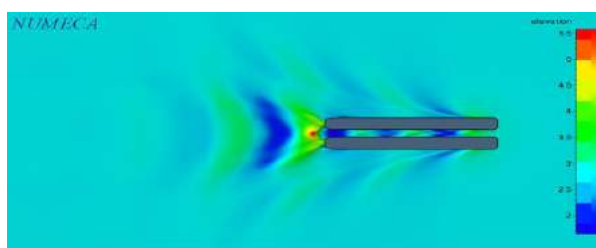
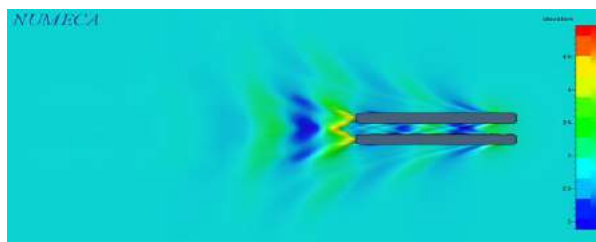


Рис. 16. Максимальные ординаты кормового буруна при скорости 33 км/ч.



а)



б)

Рис. 17. Форма волновой поверхности при движении катамарана $L=112$ м со скоростью 33 км/ч. а) $\bar{C} = 0,3$; б) $\bar{C} = 0,36$

Обоснованы параметры численного моделирования на основе верификации с результатами исследований М.Я. Алферьева.

Сравнение ординат волновых профилей для катамаранных судов и однокорпусного судна, показало, что высоты волн условного однокорпусного судна более чем в два раза превышают высоты волн катамарана при одинаковых скоростях. Результаты работы позволяют утверждать, что для речных большегрузных катамаранов существуют области размеров и скоростей движения, выбор которых обеспечит снижение сопротивления и уменьшение высот генерируемых им волн, повышая экономическую эффективность и экологическую безопасность эксплуатации таких судов. Для перспективного судна $L=152$ м с симметричным корпусом при скорости 29 км/ч (ограничение для скоростных судов на ВВП) могут быть обеспечены оптимальные значения коэффициента полного сопротивления и высоты волнового профиля при $\bar{C} = 0,56$.

Литература

1. Минеев В.И., Митрошин С.Г., Ефремов Н.А., Костров В.Н., Этин В.Л. Инновационные технологии - основа развития речного транспорта в XXI веке. Речной транспорт (XXI век). 2009. Т. 4. № 6. С. 34.
2. Этин В.Л., Лукина Е.А., Милавин С.А. «Проектирование речных скоростных грузовых накатных судов катамаранного типа». / 12-ый междунар. научно-промышленный форум "Великие реки-2010": Труды конгресса. Т.2. Н. Новгород, Нижегород. госуд. архит.-строит. ун-т - Н. Новгород: НГАСУ, 2011. – С.37-44.
3. Костров В.Н., Телегин А.И., Митрошин С.Г. Моделирование и продвижение новых технологий в паромно-транспортной логистической системе. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2008. № 24. С. 132-136.
4. Лукина Е.А., Митрошин С.Г., Битков Д.А. «Обоснование применения накатного судна для паромно-транспортных грузовых перевозок в Волжско-Камском бассейне». / Вестник ВГАВТ. Вып.28.- Н.Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2009. – С.56-62.
5. Оценка волнообразования большегрузного катамарана с различными формами внутреннего борта / Е. Ю. Чебан, О. В. Мартемьянова, С. Г. Митрошин [и др.] // Научные проблемы водного транспорта. – 2020. – № 63. – С. 109-120. – DOI 10.37890/jwt.vi63.82. – EDN AXBAQK.
6. Оценка сопротивления большегрузного катамарана численными методами / Е.Ю. Чебан, Е.А. Лукина, О.В. Мартемьянова, М.Н. Кшталтная // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2019. – № 60. – С. 122-132. – EDN CWUIJH.
7. Оценка волнообразования большегрузного катамарана для внутренних водных путей / И.К. Кузьмичев, Е.А. Лукина, С.Г. Митрошин, Е.Ю. Чебан // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 4-3(38). – С. 99-105. – EDN YPLAKC.
8. Numerical analysis of the interference effects on resistance, sinkage and trim of a fast catamaran Wei He, Teresa Castiglione, Manivannan Kandasamy & Frederick Stern Journal of Marine Science and Technology volume 20, pages292–308 (2015)
9. Riccardo Broglio, Stefano Zaghi, Andrea Di Mascio. Numerical simulation of interference effects for a high-speed catamaran. J Mar Sci Technol (2011) 16:254–269. / DOI 10.1007/s00773-011-0132-3 [Численное моделирование интерференционного эффекта высокоскоростного катамарана. (Италия, 2011 г.) Режим доступа : <http://www/sciencedirect.com>, свободный.]
10. Горьковский институт инженеров водного транспорта, Кафедра теории корабля №ТБ-38. Отчет по теме №17 «Обоснование форм и размеров грузового катамарана Ка-600Т», г. Горький, 1958 г.
11. Горьковский институт инженеров водного транспорта, Кафедра теории корабля №ТБ-76. Отчет о научно-исследовательской работе по теме №21/2315, 1963г.
12. Горьковский институт инженеров водного транспорта, Кафедра теории корабля №ТБ-126-1. Методика определения оптимальных относительных размеров и формы обводов катамаранов. г. Горький, 1976г.
13. Многокорпусные суда / А.Н. Алексеев [и др.]; под ред. В.А. Дубровского. – Л.: Судостроение, 1978. – 304 с.
14. Further experimental wash wave measurements for high speed displacement catamaran forms in shallow water. A.F. Molland, P.A.Wilson and D.J.Taunton Ship Science Report No. 123 University of Southampton December 2002
15. Souto-Iglesias, R. Zamora-Rodriguez, D. Fernandez-Gutierrez и L. Perez-Rojas. Analysis of the wave system of a catamaran for CFD validation. Experimental Fluids (2007) 42:321–332 DOI 10.1007/s00348-006-0244-4
16. Numerical analysis of the interference effects on resistance, sinkage and trim of a fast catamaran Wei He, Teresa Castiglione, Manivannan Kandasamy & Frederick Stern Journal of Marine Science and Technology volume 20, pages 292–308 (2015)
17. Experimental investigation of interference effects for high-speed catamarans Riccardo Broglio, Boris Jacob, Stefano Zaghi, Frederick Stern, Angelo Olivieri Ocean Engineering Volume 76, 15 January 2014, Pages 75-85
18. Riccardo Broglio, Stefano Zaghi, Andrea Di Mascio. Numerical simulation of interference effects for a high-speed catamaran. J Mar Sci Technol (2011) 16:254–269./ DOI 10.1007/s00773-011-0132-3 [Численное моделирование интерференционного эффекта высокоскоростного катамарана. (Италия, 2011 г.) Режим доступа : <http://www/sciencedirect.com>, свободный.]
19. Mizine I., Karafiath G., Queutey P., Visonneau M. Interference Phenomenon in Design of Trimaran Ship, FAST 2009, 2009.
20. Liang Yun, Alan Bliault, Huan Zong Rong. High Speed Catamarans and Multihulls. Technology, Performance, and Applications. New York, NY : Springer New York : Imprint: Springer, 2019. Режим доступа: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4939-7891-5>, свободный

References

1. Mineev V.I., Mitroshin S.G., Efremov N.A., Kostrov V.N., Jetin V.L. Innovacionnyye tehnologii - osnova razvitiya rechnogo transporta v XXI veke [Innovative technologies are the basis for the development of river transport in the 21st century]. Rechnoj transport (XXI vek), 4(6), 34.
2. Jetin V.L., Lukina E.A., Milavin S.A. (2011) Proektirovanie rechnyh skorostnyh gruzovyh nakatnyh su-dov katamarannogo tipa [Design of river high-speed cargo ro-ro catamarans]. 12-yj mezhdunar. nauchno-promyshlennyy forum "Velikie reki-2010": Trudy kongressa, T.2, pp.37-44.
3. Kostrov V.N., Telegin A.I., Mitroshin S.G.(2008) Modelirovanie i prodvizhenie novyh tehnologij v pa-romno-transportnoj logisticheskoj sisteme [Modeling and promotion of new technologies in the ferry transport logistics system]. Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta. 24, 132-136.

4. Lukina E.A., Mitroshin S.G., Bitkov D.A. (2009) Obosnovanie primeneniya nakatnogo sudna dlja paromno-transportnyh gruzovyh perevozok v Volzhsko-Kamskom bassejne [Rationale the use of a ro-ro vessel for ferry and transport cargo transportation in the Volga-Kama basin]. Vestnik VGAVT, 28, 56-62.
5. Estimation of the wave formation for extra-capacity catamaran with various forms of inner sides Cheban Egor Yu., Martemianova Olga V., Mitroshin Sergey G., Zotova Natalia E., Logvinov Alexei V. // Nauchnye problemy vodnogo transporta. – 2020. – № 63. – S. 109-120. – DOI 10.37890/jwt.vi63.82. – EDN AXBAQK.
6. Numerical simulation of the towing tests extra-capacity catamaran // Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta. – 2019. – № 60. – S. 122-132. – EDN CWUIJH.
7. Evaluation of wave formation of a large cargo catamaran for inland waterways. Kuzmichev Igor' K., Lukina Evgeniya A., Mitroshin Sergey G., Cheban Egor Y. // Morskie intellektual'nye tehnologii. – 2017. – № 4-3(38). – S. 99-105. – EDN YPLAKC.
8. Numerical analysis of the interference effects on resistance, sinkage and trim of a fast catamaran Wei He, Teresa Castiglione, Manivannan Kandasamy & Frederick Stern Journal of Marine Science and Technology volume 20, pages 292–308 (2015)
9. Riccardo Broglia, Stefano Zaghi, Andrea Di Mascio. Numerical simulation of interference effects for a high-speed catamaran. J Mar Sci Technol (2011) 16:254–269. / DOI 10.1007/s00773-011-0132-3 [Численное моделирование интерференционного эффекта высокоскоростного катамарана. (Италия, 2011 г.) Режим доступа : <http://www/sciencedirect.com>, свободный.]
10. Gor'kovskij institut inzhenerov vodnogo transporta, Kafedra teorii korablja №TB-38. Otchet po teme №17 «Obosnovanie form i razmerov gruzovogo katamarana Ka-600T» [Rationale of the shapes and dimensions of the cargo catamaran Ka-600T], g. Gor'kij, 1958 g.
11. Gor'kovskij institut inzhenerov vodnogo transporta, Kafedra teorii korablja №TB-76. Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote po teme №21/2315 [Report on research work on the topic No. 21/2315, 1963], 1963g.
12. Gor'kovskij institut inzhenerov vodnogo transporta, Kafedra teorii korablja №TB-126-1. Metodika opredelenija optimal'nyh odnositel'nyh razmerov i formy obvodov katamaranov [Method for determining the optimal relative dimensions and shape of the contours of catamarans]. g. Gor'kij, 1976g.
13. Mnogokorpusnye suda [Multihull vessels] / A.N. Alekseev [i dr.]; pod red. V.A. Dubrovskogo. – L.: Sudostroenie, 1978. – 304 s.
14. Further experimental wash wave measurements for high speed displacement catamaran forms in shallow water. A.F. Molland, P.A.Wilson and D.J.Taunton Ship Science Report No. 123 University of Southampton December 2002
15. Souto-Iglesias, R. Zamora-Rodriguez, D. Fernandez-Gutierrez и L. Perez-Rojas. Analysis of the wave system of a catamaran for CFD validation. Experimental Fluids (2007) 42:321–332 DOI 10.1007/s00348-006-0244-4
16. Numerical analysis of the interference effects on resistance, sinkage and trim of a fast catamaran Wei He, Teresa Castiglione, Manivannan Kandasamy & Frederick Stern Journal of Marine Science and Technology volume 20, pages 292–308 (2015)
17. Experimental investigation of interference effects for high-speed catamarans Riccardo Broglia, Boris Jacob, Stefano Zaghi, Frederick Stern, Angelo Olivieri Ocean Engineering Volume 76, 15 January 2014, Pages 75-85
18. Riccardo Broglia, Stefano Zaghi, Andrea Di Mascio. Numerical simulation of interference effects for a high-speed catamaran. J Mar Sci Technol (2011) 16:254–269./ DOI 10.1007/s00773-011-0132-3
19. Mizine I., Karafiath G., Queutey P., Visonneau M. Interference Phenomenon in Design of Trimaran Ship, FAST 2009, 2009.
20. Liang Yun, Alan Bliault, Huan Zong Rong. High Speed Catamarans and Multihulls. Technology, Performance, and Applications. New York, NY : Springer New York : Imprint: Springer, 2019.

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

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

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

Евгения Александровна Лукина, 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

Митрошин Сергей Григорьевич, кандидат технических наук, проректор по конвенционной подготовке и международной деятельности, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5. mitroshin@vsuwt.com

Мартемьянова Ольга Вадимовна, аспирант кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5 e-mail: dovnn@yandex.ru

Дмитрий Владимирович Никущенко, профессор, 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

Sergey G. Mitroshin, Ph.D. (Eng), assistant professor, vice-rector for conventional training and international cooperation, Volga State University of Water Transport 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5. mitroshin.sg@vsuwt.ru

Olga V. Martmianova, Graduate student of Hydrodynamics, ship theory and ship's ecological safety department, Volga State University of Water Transport 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5. e-mail: dovnn@yandex.ru

Dmitry V. Nikushchenko, Dr. Sci. (Eng), assistant professor, professor of department of applied mathematics and mathematical modelling, vice-rector for research, 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 15.08.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.08.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 21.08.2022.



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173
190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3
e-mail: mit-journal@mail.ru http://morintex.ru

**ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ
НАУЧНОГО ЖУРНАЛА
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов:

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи в WORD и PDF, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта и инструкция размещены на сайте www.morintex.ru
3. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
4. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
5. Рубрикатор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) должны быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу mit-journal@mail.ru (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта <http://morintex.ru> из раздела «для авторов».

На страницах журнала публикуются НОВЫЕ научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом должен быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации 14400 рублей по выставяемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

**Главный редактор научного журнала
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ

Гайкович А.И. Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

Караев Р.Н., Разуваев В.Н., Фрумен А.И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П.А. Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**

Скорыходов 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**