

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

110100100100100010101010110101010000110111000110010010010110011001100010 ISSN 2073-7173 (print)
0010100100101011110100110100100010111001001110010101001100100110001100 ISSN 2588-0233 (on line)
1001000111100110111100101001101110011001010001101010011001100101010110001010010010101110100110
00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100
0011010100110100100001011010010101000100100001111100110011001101101011001110000001110010100101
110100100101010101010010100110100110001011000101100101001100101011100101011100101101001010
00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001
11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100
00101001110011010011110001010010101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010



№ 1 Часть 1 2023
№ 1 Part 1 2023

Morskie intelektual'nye tehnologii



01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
1100101111000100110000110110111011010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001100110
110101100001010111101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001
10011010011011111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 1010
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 011





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

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 1 часть 1 2023 Сквозной номер 59

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

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 1 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 № 2073-7173 (print)
ISSN №2588-0233 (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

А.Ш. Готман, д.т.н., профессор, Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск

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

И.Г. Захаров, д.т.н., профессор, заместитель генерального директора ЦМКБ «Алмаз», Санкт-Петербург

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

Д.В. Никущенко, д.т.н., проректор по научной работе, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 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 № 2073-7173 (print)
ISSN № 2588-0233 (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

A.Sh. Gotman, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Siberia State University of water transport, Novosibirsk, 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

I.G. Zakharov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-CEO ZMKB "Almaz", St. Petersburg, Russia

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

D.V. Nikushchenko, Dr. Sci. (Eng.), Vice-Rector for Research, Saint-Petersburg State Marine Technical University, 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
- **Владимир Борисович Мелехин**, доктор технических наук, профессор, профессор Дагестанский государственный технический университет
- **Юрий Павлович Потехин**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Игорь Григорьевич Захаров**, доктор технических наук, профессор, ЦМКБ «Алмаз»
- **Марина Николаевна Лютикова**, кандидат технических наук, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
- **Александр Алексеевич Воршевский**, доктор технических наук, 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
- **Игорь Михайлович Данцевич**, кандидат технических наук, НИИ «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова»
- **Виктор Владимирович Дерябин**, доктор технических наук, доцент Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Иван Иванович Костылев**, доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Нелли Алексеевна Седова**, кандидат технических наук, доцент, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
- **Владимир Владимирович Ярисов**, доктор технических наук, доцент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта
- **Сергей Павлович Столяров**, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Станислав Альбинович Скоморовский**, кандидат технических наук, доцент, 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

- **Юрий Семёнович Федосенко**, доктор технических наук, профессор, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Александр Алексеевич Таранцев**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Сергей Николаевич Павликов**, кандидат технических наук, профессор, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
- **Виктория Юрьевна Семенова**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Марина Петровна Лебедева**, кандидат технических наук, доцент, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Сергей Леонидович Синябрюхов**, доктор химических наук, доцент, Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук
- **Юлия Борисовна Ржонсницкая**, доктор физико-математических наук, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
- **Ян Янович Эглит**, доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Александр Владимирович Небылов**, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, Государственный университет аэрокосмического приборостроения

**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
- **Vladimir B. Melekhin**, Dr. Sci. (Eng), professor, Dagestan State Technical University
- **Jurij P. Potechin**, Ph.D. (Eng), associate professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Igor G. Zakharov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, ZMKB “Almaz”
- **Marina N. Lyutikova**, Ph. D (Eng)., Admiral Ushakov Maritime State University
- **Aleksandr A. Vorshevskii**, Dr.Sci. (Eng), St. Petersburg State Marine Technical University
- **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
- **Igor M. Dantsevich**, Ph.D. (Eng), Research Institute Admiral Ushakov maritime state university
- **Victor V. Deryabin**, Dr. Sci. (Eng.), associate professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Ivan I. Kostylev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Nelly A. Sedova**, Ph.D. (Eng), Associate professor, Maritime state university named after admiral G.I. Nevelskoy
- **Vladimir V. Yarisov**, Dr. Sci. (Eng), associate professor, Immanuel Kant Baltic Federal University
- **Sergei P. Stoljarov**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Stanislav A. Skomorovskij**, Ph.D. (Eng), associate professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Anastasia 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
- **Iurii S. Fedosenko**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Volga State University of Water Transport
- **Alexander A. Tarantsev**, Dr.Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Sergej N. Pavlikov**, Ph.D. (Eng), professor, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University
- **Viktoriya Yu. Semenova**, Dr. Sci. (Eng.), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg

- **Marina P. Lebedeva**, Ph.D. (Eng), associate professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Sergey L. Sinebryukhov**, Dr. Sci. (Chem), Associate professor, Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
- **Uliia B. Rzhonsnitskaia**, Dr. Sci. (Phys & Math), Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
- **Jan J. Eglit**, Dr. Sci. (Eng.), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Aleksandr V. Nebylov**, Dr. Sci. (Eng.), professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation



51 центральный конструкторско - технологический институт судоремонта

Санкт - Петербург
190021, Английская наб., д. 38
Тел./факс: +7 (812) 315-49-45
Email: office@51cktis.ru

Санкт - Петербург, Ломоносов
198412, ул. Михайловская, д. 14
Тел./факс: +7 (812) 423-16-00

Решением Минобороны России на институт возложены функции проектанга по 137 проектам надводных кораблей и судов ВМФ иностранной постройки и кораблей, проектанты которых отсутствуют (ликвидированы).

Совместным Решением Минпромторга и Минобороны России институт назначен головной организацией по разработке ремонтной документации на надводные корабли и суда ВМФ.

Институт выполняет техническое освидетельствование и обследование кораблей, судов и прочих плавучих сооружений с целью определения возможности дальнейшей эксплуатации; осуществляет разработку государственных военных стандартов ГОСТ РВ; обеспечивает исполнителей ГОЗ всеми видами документации на корабли (суда), их составные части и комплектующие изделия из фонда технической документации, содержащего 2 900 000 документов по 784 проектам.



СОДЕРЖАНИЕ	стр.
К 80-летию Дмитрия Алексеевича Скороходова.....	14
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ	
Москаленко М.А., Черняхович С.Е., Пушкарёв И.И., Титов А.В. Технологии автономного судоходства, тенденции и перспективы.....	18
Назаров А.Г. Особенности нормативных подходов к малым судам.....	29
Плотников К.В., Долгов Д.С. Выбор типа и геометрических характеристик судовых рулей: анализ современных проектных решений.....	38
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Осипов В.И. Сравнение численных результатов метода расчета процесса продольного спуска судна на воду и метода посадки судна на мель.....	51
Крыжевич Г.Б. Диаграммы предельных амплитуд цикла для конструкций из полимерных композиционных материалов.....	59
Ромадин Д.С., Яковлев А.Ю. Обоснование применимости полуэмпирического метода расчета гидродинамических профилей для прогнозирования отрывных и переходных явлений.....	64
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Леонтьев Л.Б., Леонтьев А.Л., Молоков К.А. Повышение долговечности прецизионных деталей судовых дизелей формированием композиционных покрытий на поверхности плунжера.....	73
Боран-Кешишьян А.Л., Братан С.М., Харченко А.О., Владецкая Е.А. Реакция на произвольный сигнал динамической системы виброизолирующего устройства станка в условиях плавучей мастерской.....	81
СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Руднев Б.И., Повалихина О.В. Анализ влияния процесса сгорания на конвективный теплообмен в цилиндре судового высокооборотного дизеля.....	86
Шулика Н.Е., Поддубный Н.А., Епихин А.И., Епихин Э.А. Применение сетей Байеса для создания модели возникновения риска пожара в машинном отделении.....	91
Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Расчётная оценка безопасности хранения отработавшего ядерного топлива в приреакторном бассейне выдержки.....	100
Кича Г.П., Дрозд М.С. Уточненные зависимости для определения бросовой теплоты судового высокофорсированного дизеля.....	105
Епихин А.И. Использование искусственной нейронной сети для определения уровня износа цилиндропоршневой группы судового двигателя.....	112
Дологлонян А.В., Матвеев В.Т., Клименко А.Г. Управление генерацией теплоты в когенерационных газотурбинных установках с регенерацией на частичных нагрузках.....	120
Нитяговский А.В., Грибиниченко М.В., Портнова О.С., Лапин Ю.А. Экспериментальное исследование динамических характеристик роторов судовых турбогенераторов с опорами на газовой смазке.....	129
Дядик А.Н., Маловик Д.С. Очистка водорода для реакции на низкотемпературных топливных элементах подводных аппаратов.....	134
Кожемякин В.В., Кошкин Н.Д. Расчетно-теоретическое исследование двигательного инжектора на водородно-кислородном топливе.....	139
Стаценко В.Н., Леонтьев Л.Б., Садыков Р.Х. Исследование жидкостной пленочной нейтрализации газовых выбросов судовых энергетических установок.....	144
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ	
Мартынов В.Л., Божук Н.М., Ильин Г.В., Кречетова Э.В., Шиманская М.С., Шиманская Г.С. Оптимизации гидроакустических информационных систем подводных аппаратов для повышения эффективности подводного поиска.....	149

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Астреин В. В., Филатов В. И. Принципы автоматического мониторинга и контроля движения судна в режиме реального времени.....	158
Маринов М. Л., Скороходов Д.А., Галиев М.С. Анализ проблемы поиска морских судов небольшого водоизмещения в районе ответственности арктических спасательных центров.....	169
Филошов Ю.П., Палагушкин Б.В., Павлова М.А. Сравнение законов управления неявнополюсной синхронной машиной.....	175
Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Принцип конкретизации абстрактных знаний автономным интеллектуальным роботом в процессе планирования поведения в условиях неопределенности....	181
Лютикова М.Н., Бузенков И.И., Халеева Е.П., Малахов С.О., Цепордей О.В. Совмещение систем позиционирования универсальных многоцелевых буксируемых геофизических комплексов с текущей позицией судна-носителя.....	191
Дюк В.А., Каминский В.Ю. Сравнительное исследование методов машинного обучения в задаче диагностики синхронных электродвигателей.....	200
Семенова-Тян-Шанская В.А., Ченский Т.С. Использование метода k-средних для оценки экономических показателей рейса судна.....	205
Егоров С.Б., Горбачев Р.И. Вероятностная характеристика обнаружения сигнала в обнаружителе с порогами по уровню и длительности.....	213

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Семенов А.Д., Сампиев А.М. Распределение контейнеров по «бэям» при составлении грузового плана контейнеровоза.....	219
Котенко А.Г. Анализ тенденций перевозки нефтеналивных грузов через морские порты Российской Федерации.....	224
Куракин А.И., Струков И.Г., Скобликов Я.П., Карпов В.М., Ефимов Е.И. Влияние импульсного режима наплавки на микроструктуру наплавленного металла при электродуговом выращивании (WAAM) тонкостенного элемента с использованием Al-Mg сплава.....	230

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Недоступ А.А., Ражев А.О., Насенков П.В., Дятченко С.В., Сысенко В.В., Аскарлов Д.В., Сергеев Е.И. Разработка физической модели процесса эксплуатации разноглубинного тралового комплекса.....	237
Филатов В.И., Астреин В.В. Синтез нечёткой системы автоматического управления скоростным режимом автономного судна при следовании по программной траектории.....	245

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

Липко И.Ю., Титов А.В. Онлайн прогноз времени присутствия с помощью а-профилей в задаче стабилизации курса АНПА.....	254
Кабанов А.А., Крамарь В.А., Титов А.В. Влияние качки на точность горизонтальных смещений судна.....	261
Руденко А.И. К вопросу о моделировании стоячих волн с учетом стратификации в Балтийском море.....	268
Колин А.Д., Медведев В.В. Схема построения вычислительного эксперимента расчета климатических и ионосферных параметров Земли.....	273
Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Семенов А.Д., Русинов И.В. Аналитическая симуляционная модель произвольной системы массового обслуживания.....	278
Лютикова М.Н., Панькина С.И. Исследование вопроса безопасного сближения судов на основе нечёткой модели.....	282

CONTENTS	page
For Dmitriy Skorokhodov's 80-th anniversary.....	14
DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS	
Mikhail A. Moskalenko, Stanislav E. Cherniakhovich, Igor I. Pushkarev, Alexey V. Titov Autonomous shipping technologies, trends and prospects.....	18
Albert G. Nazarov Specifics of normative approaches to small ships.....	29
Kirill V. Plotnikov, Dmitriy S. Dolgov The type and geometry of ship rudders choosing: the analysis of current designs.....	38
THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS	
Vladislav I. Osipov Comparison of the numerical results of the method for calculating the process of longitudinal descent of the ship on the water and the method of landing the vessel on the ground.....	51
Gennady B. Kryzhevich Constant life diagrams for structures from polymer composite materials.....	59
Dmitry S. Romadin, Aleksey Yu. Yakovlev Applicability substantiation of the semi-empirical hydrofoils calculation method for predicting separation and transient phenomena.....	64
TECHNOLOGY OF SHIP BUILDING. SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Lev B. Leont'ev, Andrey L. Leont'ev, Konstantin A. Molokov Increasing the durability of precision parts of marine diesel engines by forming composite coatings on the surface of the plunger.....	73
Anastas L. Boran-Keshishyan, Sergey M. Bratan, Alexander O. Kharchenko, Ekaterina A. Vladetskaya Reaction to an arbitrary signal of the dynamic system of the vibration isolation device of the machine in a floating workshop.....	81
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Boris I. Rudnev, Olga V. Povalikhina Analysis of influence process combustion on convective heat transfer in cylinder of marine high speed diesel.....	86
Nikita E. Shulika, Nikita A. Poddubniy, Alexey I. Epikhin, Eduard A. Epikhin Application of Bayesian networks to create a fire risk model in the engine room.....	91
Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov. Estimated safety assessment of spent nuclear fuel storage in the pre-reactor holding pool.....	100
Gennadiy P. Kicha, Mikhail S. Drozd Updated dependencies for determination of heat loss of ship's high-powered diesel engine.....	105
Alexey I. Epikhin Using an artificial neural network to determine the wear level of the cylinder piston group of a marine engine.....	112
Andrey V. Dologlonyan, Valeriy T. Matviienko, Alexandr G. Klimenko. Control of heat generation in cogeneration gas-turbine plants with regeneration at partial loads.....	120
Andrei V. Nitiagovskii, Matvey V. Gribinichenko, Olesya S. Portnova, Yury A. Lapin Experimental study of dynamic characteristics of rotors of marine turbogenerators with gas-lubricated supports.....	129
Aleksandr N. Dyadik, Dmitry S. Malovik Purification of hydrogen for reaction on low-temperature fuel elements of underwater vehicles.....	134
Vyacheslav V. Kozhemyakin, Nikita D. Koshkin Computational and theoretical research of propulsion injector on hydrogen-oxygen fuel.....	139
Vladimir N. Statsenko, Lev B. Leont'ev, Ruslan H. Sadykov Research of film liquid neutralization of gas emissions from.....	144
INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS	
Victor L. Martynov, Nikolay M. Bozhuk, Gennady V. Ilyin, Emilia V. Krechetova, Marianna S. Shimanskaya, Galina S. Shimanskaya Optimization of hydroacoustic information systems of underwater vehicles to improve the efficiency of underwater search.....	149
SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING	
Vadim V. Astrein, Viktor I. Filatov Principles of automatic monitoring and control ship movements in real time.....	158

Marin. L. Marinov, Dmitriy A. Skorokhodov, Maxim S. Galiev Analysis of the problem of searching for small displacement sea vessels in the area of responsibility of Arctic rescue centers.....	169
Yury P. Filushov, Boris V. Palagushkin, Marina A. Pavlova Comparison of the control laws of an implicit synchronous machine.....	175
Vladimir B. Melekhin, Mikhail V. Khachumov The principle of concretization of abstract knowledge by an autonomous intelligent robot in the process of planning behavior under uncertainty.....	181
Marina N. Lyutikova, Igor I. Buzenkov, Elena P. Khaleeva, Sergey O. Malakhov, Oksana V. Tsepordey Combining of universal multi-purpose towed geophysical complexes positioning systems with the carrying ship's present position.....	191
Vyacheslav A. Duke, Valery Yu. Kaminsky Comparative study of machine learning methods in the task of diagnostics of synchronous electric motors.....	200
Vera A. Semenova-Tyan-Shanskaya, Timofei S. Chenskii Application of the k-means method to estimate the economic performance of the ship's route.....	205
Stanislav B. Egorov, Roman I. Gorbachev Probability function of detection for signal detector with level and time thresholds.....	213
AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS	
Alexander L. Kuznetsov, Alexander V. Kirichenko, Anton D. Semenov, Adam M. Sampiev. The algorithm of container grouping for the bayplan creation purposes.....	219
Aleksey G. Kotenko Analysis of trends in oil cargo transportation through seaports of the Russian Federation.....	224
Artur I. Kurakin, Ilya G. Strukov, Iakov P. Skoblikov, Vyacheslav M. Karpov, Evgeny I. Efimov Influence of the surfacing mode on the microstructure of the deposited metal produced by wire arc additive manufacturing using Al-Mg alloy.....	230
COMPUTER MODELING AND DESIGN AUTOMATION	
Alexander A. Nedostup, Alexey O. Razhev, Pavel V. Nasenkov, Sergey V. Diatchenko, Vladimir V. Sysenko, Dmitry V. Askarov, Egor I. Sergeev Development of a physical model of the operation process of a mid-water trawl complex.....	237
Viktor I. Filatov, Vadim V. Astrein. Fuzzy automatic control system synthesis for ship's speed mode during sailing through program trajectory.....	245
MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES	
Ivan U. Lipko, Alexey V. Titov Online estimation of time presence with a-profiles in the course keeping problem of AUV.....	254
Aleksey A. Kabanov, Vadim A. Kramar, Alexey V. Titov Influence of pitching on the accuracy of horizontal displacements of the vessel.....	261
Alexey I. Rudenko On Modelling of Standing Waves Considering the Stratification in the Baltic Sea.....	268
Anton D.Kolin, Vladimir V.Medvev Scheme of building a computational experiment for calculating climatic and ionospheric parameters of the Earth.....	273
Alexander L. Kuznetsov, Alexander V. Kirichenko, Anton D. Semenov, Igor V. Rusinov Analytical simulation model of a query system.....	278
Marina N. Lyutikova, Svetlana I. Pankina Investigation of the issue of safe approach of ships based on the fuzzy model.....	282

К 80-летию Дмитрия Алексеевича Скороходова



Скороходов Дмитрий Алексеевич родился 16 февраля 1943 года в селе Русско-Добрино, Клявлинского района, Куйбышевской (ныне Самарской) области. В 1950-м году поступил, а в 1960-м году закончил среднюю школу в посёлке Сосново Ленинградской области. До мая месяца 1961 – ого года работал монтёром-телефонистом в Управлении ленинградской городской телефонной сети. В 1961-ом году поступил на судомеханический факультет в Ленинградское Высшее инженерное морское училище им. адмирала С.О.Макарова. В 1963-ем году приказом МО СССР был переведён на электротехнический факультет Высшего Военно-Морского инженерного училища им. Ф.Э.Дзержинского, которое закончил в 1966-ом году. С 1966г. по 1967г. проходил службу в качестве инженера-электрика на Краснознаменном Северном Флоте. С 1967г. по 1968г. учился на курсах офицерского состава по скрытности и защите кораблей при Военно-Морской Академии им. адмирала Н.Г. Кузнецова. В 1967г. было присвоено звание старший лейтенант-инженер. В 1968г. был назначен в 1 ЦНИИ МО в отдел “Комплексной автоматизации технических средств кораблей ВМФ», где последовательно занимал должности младшего научного сотрудника, старшего научного сотрудника, начальника лаборатории и начальника отдела.

В 1968 –1972 г.г. занимался вопросами создания унифицированного авторулевого “Аист”, системы автоматического управления движением “Штиль” для катера на подводных крыльях, системы автоматического управления движением для самоходной модели СМ-9 и руководил мореходными испытаниями этих систем. В 1970 году было присвоено звание капитан-лейтенант-инженер. В 1971 г. был назначен старшим наблюдающим по созданию комплексного тренажера по управлению движением и техническими средствами корабля на воздушной подушке «Кальмар». В 1973 году проводил испытания системы управления движением «Чайка» на КВП «Джейран» в г. Балтийске.

В 1974 году защитил диссертацию на тему «Исследование и выбор энергетических характеристик систем управления движением кораблей с динамическими принципами поддержания». После защиты кандидатской диссертации был назначен руководителем

группы «Автоматизации газотурбинных установок кораблей ВМФ». В 1975 году было присвоено звание капитан 3 ранга-инженер.

С 1974 года по 1986 год являлся старшим наблюдающим по созданию систем управления движением «Коралл» и «Стрела» для кораблей на подводных крыльях «Ураган» и «Сокол», комплексной системы управления техническими средствами «Двин» КПК «Ураган», системы управления газотурбинной установкой «Коралл-2», унифицированной системой управления и защиты газотурбинных двигателей, комплексных систем управления движением и техническими средствами «Орион-КА», «Орион-КАТ», «Флора», «Флора-32», кораблей на воздушной подушке «Кальмар», «Омар», тральщика на воздушной подушке, КВП «Косатка», КВП «Зубр», и системы «Смена-3» для корабля-экраноплана «Лунь». С 1974г. являлся старшим наблюдающим по комплексной автоматизации надводных кораблей ВМФ и участвовал в испытаниях в качестве председателя МВК и члена Госкомиссии практически всех типов кораблей на воздушной подушке, кораблей на подводных крыльях, корабля-экраноплана и надводных кораблей ВМФ.

В 1979 году был назначен на должность старшего научного сотрудника и руководителя группы автоматизации управления движением надводных кораблей и КДПП. В 1980 году присвоено звание капитан 2 ранга – инженер и ученое звание “старший научный сотрудник” по специальности “Автоматическое управление и регулирование, управление технологическими процессами в корабельных технических средствах”. В 1986 году был назначен начальником лаборатории «Управления движением подводных лодок, надводных кораблей и КДПП» и присвоено звание капитан 1 ранга. В 1987 году был назначен главным наблюдающим за комплексом научно- исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию технических средств диагностирования надводных кораблей и подводных лодок «Диагноз-2» и по внедрению систем информационной поддержки на надводные корабли и подводные лодки.

В 1988 году защитил докторскую диссертацию на тему «Оптимизация основных характеристик систем автоматического управления движением кораблей с динамическими принципами поддержания» и в том же году был назначен начальником отдела «Комплексных систем управления техническими средствами кораблей ВМФ». В 1992 году на заседании ВАК СССР присвоено ученое звание «профессор» по специальности «Системы обработки информации и управления». 31 марта 1994 году приказом Министра обороны РФ уволен в запас.

За время службы в ВМФ Скороходовым Д.А. и его учениками разработана совокупность методов, направленных на решение целого ряда сложных проблем в области создания автоматических систем управления техническими средствами кораблей ВМФ. Кроме того, он внес личный вклад в вопросах: общеметодологических основ обоснования характеристик систем управления и обработки информации кораблей и судов; разработки процедур оптимизации и декомпозиции целей управления техническими средствами кораблей и судов; обоснования показателей эффективности систем управления; обоснования технических требований к системам управления и обработки информации; развития системного подхода к диагностированию технических средств и создания систем интеллектуальной поддержки при борьбе с авариями на кораблях и судах; теоретического и практического решения задач оптимального и противоаварийного управления.

С 01 апреля 1994 года по 07 августа 1995 года работал заместителем директора НТК №1 НПО «Аврора» по научно-исследовательским работам, а с 1995г. по настоящее время работает в системе Российской академии наук. Вначале ведущим научным сотрудником Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко, с 1996г. главным научным сотрудником, а с 1997г. заведующим лабораторией «Проблем безопасности транспортных систем». В 2004г. был назначен заместителем директора по научной работе, а с 2006 года по состоянию здоровья перешёл на работу главным научным сотрудником лаборатории «Проблем безопасности транспортных систем» того же института.

С 1994г. по 2002 г. работал по совместительству на должности профессора кафедры «Комплексные системы управления техническими средствами подводных лодок» Военно-Морского инженерного института, а с 1997г. по настоящее время на должности профессора

кафедры «Корабельные системы управления» СПбГЭТУ (ЛЭТИ). При этом создал следующие курсы:

- «Элементы систем автоматического управления». Военно-Морской инженерный институт.
- «Теория автоматического управления техническими средствами подводных лодок». Военно-Морской инженерный институт.
- «Теория автоматического управления техническими средствами атомных энергетических установок». Военно-Морской инженерный институт.
- «Системный анализ и принятие решений». Военно-морской инженерный институт.
- «Устройство и технические средства корабля». Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ).
- «Интегрированные системы управления кораблём». Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ).
- Функции и режимы интегрированных систем управления кораблём. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ).
- Архитектура интегрированных систем управления кораблём. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ).
- «Комплексная оценка работоспособного состояния судовых машин». Санкт-Петербургский государственный морской технический университет.

На протяжении более 50 лет Скороходов Д.А. ведет активную научную работу. Под руководством и при непосредственном участии в 1ЦНИИ МО и в Институте проблем транспорта им. Н.С. Соломенко выполнено более 70 НИР, посвященных различным аспектам организации, развития автоматизации кораблей, безопасности транспортной системы и совершенствования транспортных технологий региональных транспортных систем. Скороходовым Д.А. сформировано и последовательно развивается новое фундаментальное направление науки «Теория безопасности транспортных систем», имеющее целью формулировку важнейших принципов развития отечественной транспортной отрасли в этом направлении.

Кроме того, за годы работы в Институте проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Скороходовым Д.А. и его учениками разработаны вопросы:

- Конструктивной безопасности высокоскоростных судов.
- Безопасности региональных транспортных систем.
- Безопасности Северного морского пути, как мультимодального коридора.
- Оценки эффективности системы управления безопасностью судоходной компании.
- Оценки эффективности новых конструктивных разработок в области судостроения.

В настоящее время он развивает научное направления оценки эффективности системы экологической безопасности морской моды мультимодального коридора.

Скороходовым Д.А. сформирована научная школа, которая способствует решению сложных задач, повышения эффективности систем управления движением, техническими средствами, и систем обеспечения безопасности транспортных средств. Он является автором более 400 научных работ, в том числе более 280 научных статей и докладов, более 70 НИР, 22 монографий, 3 учебников, 1 курса лекций, 5 учебных пособий, 2 методических указаний, 127 авторских свидетельств и 3 патентов на изобретения, более 30 из которых внедрены на корабли ВМФ. Более 30 лет являлся членом различных докторских диссертационных советов по присуждению учёных степеней и председателем государственных экзаменационных комиссий Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербургского морского государственного технического университета и Санкт-Петербургского государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О.Макарова.

С 1995 года является активным участником конференций, проводимых ООО «НИЦ «Моринтех», с 2008 года - членом редколлегии журнала «Морские интеллектуальные технологии», а в настоящее время - заместителем главного редактора журнала и его

активным рецензентом статей, поступающих в журнал, и автором по направлению автоматизации и безопасности транспортных систем.

Научная и организационная работа была оценена научной общественностью и Правительством страны. Скороходов Д.А. награжден многими медалями, а также знаком «Почетный работник транспорта России», юбилейной медалью «100 лет профсоюзам России», медалью «150 лет академику А.Н.Крылову», медалью «За вклад в реализацию государственной политики в области научно-технического развития», юбилейным знаком «В память 200-летия Управления водными и сухопутными сообщениями».

**Сердечно поздравляем Вас, уважаемый Дмитрий Алексеевич,
с юбилеем, желаем здоровья, счастья и дальнейших успехов
в Вашей плодотворной деятельности на благо России!**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS

Научная статья

УДК 656.61.052

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.001>

Технологии автономного судоходства, тенденции и перспективы

М.А. Москаленко¹ asmsh@rambler.ru, С.Е. Черняхович¹ sboats@mail.ru,
И.И. Пушкарёв¹ b_r_i_g88@mail.ru, А.В. Титов² titov@asu.edu.ru

¹Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского,

²Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева

Аннотация. В статье авторами освещается современное состояние существующих технологий автономного судоходства, тенденции и перспективы автономного судоходства. В настоящее время, морской транспорт на фоне увеличения объемов перевозок столкнулся с такими проблемами, как увеличение аварийности на флоте, высокие эксплуатационные расходы, нехватка специалистов для работы. Данные обстоятельства вызывают серьезный интерес у участников судоходного рынка к созданию технологий автономного и дистанционного управления судами. Подобные технические решения позволят, в перспективе, судоходным компаниям сделать морские грузоперевозки более безопасными, при одновременном снижении части эксплуатационных расходов. Рассмотрено международное регулирование вопросов нормативно-правовой базы, классификации, испытаний морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов. Дана информация об европейских исследовательских проектах, признанных лидерами в области автономного судоходства Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks, Advanced Autonomous Waterborne Applications Initiative и Norwegian Forum for Autonomous Ships. Описано развитие тематики автономного судоходства в Российской Федерации. С 2019 года реализуется ряд крупных проектов, направленных на создание технических и правовых условий для широкой эксплуатации автономных коммерческих судов под флагом РФ. Особенностью реализуемых проектов является принцип полной функциональной эквивалентности, позволяющий эксплуатировать автономные суда в рамках действующих международных конвенций. Результатом реализации отечественных проектов, может стать лидерство России в области национального регулирования и коммерческой эксплуатации автономных судов.

Ключевые слова: автономное судоходство, автономное судно, конвенционные требования, судоходство, технология, автоматизация, безопасность

Для цитирования: Москаленко М.А., Черняхович С.Е., Пушкарёв И.И., Титов А.В. Технологии автономного судоходства, тенденции и перспективы, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 18—28. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.001

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.001>

Autonomous shipping technologies, trends and prospects

Mikhail A. Moskalenko¹ asmsh@rambler.ru, Stanislav E. Cherniakhovich¹ sboats@mail.ru,
Igor I. Pushkarev¹ b_r_i_g88@mail.ru, Alexey V. Titov² titov@asu.edu.ru

¹Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation,

²Astrakhan State University name of V.N. Tatishcheva, Astrakhan, Russian Federation

Annotation. In the article, the authors highlight the current state of existing autonomous navigation technologies, trends and prospects for autonomous ships. Currently, sea transport, against the background of an increase in traffic volumes, has faced such problems as an increase in accidents in the fleet, high operating costs, and a shortage of specialists to work with. These conditions cause serious interest among the participants of the shipping market in the creation of technologies for autonomous and remote control of ships. Such technical solutions will allow, in the future, shipping companies to make sea cargo transportation safer, while reducing part of the operating costs. The international regulation of the issues of the regulatory framework, classification, testing of maritime autonomous and remotely controlled surface ships is considered. Information is given about European research projects recognized as leaders in the field of autonomous navigation Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks, Advanced Autonomous Waterborne Applications Initiative and Norwegian Forum for Autonomous Ships. The development of autonomous navigation in the Russian Federation is described. Since 2019, a number of major projects have been implemented aimed at creating technical and legal conditions for the widespread operation of autonomous commercial vessels under the flag of the Russian Federation. A feature of the o projects is the principle of full functional equivalence, which allows the operation of autonomous ships within the framework of existing international conventions. The result of the implementation of domestic projects may be Russia's leadership in the field of national regulation and commercial operation of autonomous ships.

Key words: autonomous navigation, autonomous ship, conventional requirements, shipping, technology, automation, safety

For citation: Mikhail A. Moskalenko, Stanislav E. Cherniakhovich, Igor I. Pushkarev, Alexey V. Titov, Autonomous shipping technologies, trends and prospects, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 18—28. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.001

Введение

Судоходство, одна из наиболее интернационализированных областей деловой активности на планете, которая затрагивает каждую нацию и культуру. Создание автономных судов способно совершить революцию во всей системе логистики мировой торговли.

Автономное судоходство как отрасль экономики будет базироваться на использовании автономных судов с соответствующей береговой инфраструктурой, обеспечивающих автономное судовождение как процесс, как технологию перевозки. Применение автономных судов приведет в будущем в большей степени вероятности к постепенному переходу от традиционного к автономному судоходству.

Между тем, требуются необходимые гарантии безопасности и надежности поставок при внедрении автономного судовождения в судоходстве.

В соответствии с данными отчета Allianz Global Corporate & Specialty (AGCS) за 2021 год, ситуация со сменой экипажей на судах - это настоящий гуманитарный кризис, который продолжает сказываться на здоровье и благополучии моряков. По оценкам, в марте 2021 года около 200000 моряков оставались на борту судов, которые не могли быть отправлены домой из-за ограничений COVID-19, что в конечном итоге скажется на безопасности. Уже были инциденты на судах, когда экипажи находились на борту дольше, чем следовало. Также, в будущем страховые компании могут увидеть рост количества претензий [1].

Стоит отметить, что работа автоматики управляющей движением судна может стать более точной и корректной по сравнению с действиями экипажа, которые зависят не только от квалификации, но и от многих субъективных факторов. Возможно, применение автономных судов способно повлиять на повышение уровня безопасности на флоте [2].

Экономическим эффектом от применения автоматического и дистанционного управления судами объективно должно стать снижение прямых затрат судоходных компаний на экипаж. По данным Moore Stephens LLP, содержание экипажа составляет 19% от операционных расходов по судну [3].

Еще одной весомой причиной для отказа от экипажа на судне является сегодня дефицит квалифицированных кадров. Конференция Организации Объединенных Наций по торговле и развитию (ЮНКТАД) Российский профсоюз моряков (РПСМ) отмечают, что сегодня «Без действий всех заинтересованных сторон, отрасль может остаться без квалифицированных кадров [4].

Сокращение, либо отказ от экипажа в определенной степени повлияет на оптимизацию эксплуатационных расходов за счет модели - slow steaming.

Slow steaming – тенденция, возникшая в мировом судоходстве с помощью которой скорость судна

оптимизируется в зависимости от состояния моря в реальном времени, погоды и загруженности порта назначения. Компания Wärtsilä оптимизирующая эффективность использования судовых силовых установок считает, что расход топлива в рейсе туда-обратно (например, Азия- Европа-Азия) снижается на 45% за счет снижения скорости грузового судна с 27 узлов до 22 узлов и на 59% при снижении скорости до 18 узлов [5]. При снижении скорости движения экономится топливо, но возрастают эксплуатационные расходы связанные с увеличением длительности рейса такие как, затраты на содержание экипажа, страхование, дополнительное техническое обслуживание, включая расходные материалы, увеличение платы за аренду.

Снижение расходов на экипаж не является критически значимой величиной, но при постоянном стремлении судовладельцев уменьшить себестоимость перевозки и выжить в конкурентной среде может повлиять на целесообразность использования режима slow steaming.

Стоит отметить, что при постройке на верфи современного автономного судна с инновационным оборудованием системы управления, затраты на постройку, возможно не превысят стоимость традиционного судна, несмотря на то что автономное судно с технической точки зрения будет более совершенным и экономически более выгодным в эксплуатации.

Отсутствие полноценных надстроек для размещения экипажа и отсутствие систем жизнеобеспечения, позволит увеличить вместимость и энергоэффективность судна. Дополнительно, отсутствие экипажа на борту судна исключит затраты на применимое оборудование и снабжение, требуемое положениями Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (МК МАРПОЛ) и Международной конвенции по охране человеческой жизни на море (МК СОЛАС). Также, можно ожидать увеличение вместимости палубы, так как не потребуется выполнять требования к обзору, предусмотренные в МППСС-72.

Не стоит забывать и о том обстоятельстве, что отсутствие экипажа даст экономии при производстве судоремонтных работ, в том числе снижением времени нахождения судна в ремонте.

Международное регулирование

Международная морская организация (ИМО) являясь специализированным учреждением Организации Объединенных Наций, по установлению стандартов в области безопасности и нормативно-правовой базы судоходной отрасли, предложило использовать унифицированное название такого типа судов Maritime Autonomous Surface Ships (MASS), морские автономные надводные суда. В РФ целесообразно использовать названия закрепленные в «Положениях по классификации морских автономных и

дистанционно управляемых надводных судов (МАНС) [6] (далее – Положения по классификации МАНС), несмотря на то обстоятельство, что сейчас в русскоязычном пространстве используются различные обозначения этого типа судов: безэкипажное, беспилотное, автоматическое. В Положениях по классификации МАНС закреплено сокращение МАНС – морское автономное или дистанционно управляемое надводное судно и термины автономное судно или автономно управляемое судно – судно, удовлетворяющее всем применимым требованиям правил РС, международным документам и требованиям, которое управляется без участия человека и термин дистанционно управляемое судно – судно, которое на всех уровнях управляется из центра дистанционного управления.

В 2017 году на 98 сессии Комитета по безопасности на море (КБМ) ИМО было инициировано рассмотрение вопросов относительно МАНС [7]. КБМ согласился с тем, что ИМО должна предпринимать активные действия и взять на себя ведущую роль в вопросе исследований по определению регуляторной сферы рациональной эксплуатации МАНС. Это решение поддержали Норвегия, Дания, Эстония, Финляндия, Япония, Нидерланды, Южная Корея, Великобритания и США

На 100-й сессии КБМ в 2018 году ИМО определила степени автономности судов [8]:

Первая степень: Судно с автоматизированными процессами и поддержкой принятия решений: экипаж находится на борту для управления и контроля судовых систем и функций. Некоторые операции могут быть автоматизированы и иногда выполняться без участия экипажа, но с экипажем на борту, готовым взять управление на себя.

Вторая степень: Дистанционно управляемое судно с экипажем на борту: Судно контролируется и управляется из удаленного места. На борту есть экипаж, который может взять на себя управление.

Третья степень: Дистанционно управляемое судно без экипажа на борту: Судно контролируется и управляется из удаленного места. На борту нет экипажа.

Четвертая степень: Полностью автономное судно: управляющая система судна способна самостоятельно принимать решения и определять требуемые действия.

Необходимо учесть, что МАНС могут эксплуатироваться в одной или нескольких степенях автономности в течение одного рейса. Например, при длительных переходах в открытом море в стабильных условиях использовать полностью автономный режим (четвертая степень), при сложной навигационной обстановке (вторая и третья степень), при выходе и заходе в порт управляться экипажем (первая степень).

В 2019 году на 101-й сессии КБМ по вопросу международно-правового регулирования МАНС [9] были детально обсуждены вопросы испытаний МАНС, было утверждено «Временное руководство по испытаниям судов МАНС» циркуляр MSC.1/Circ.1604 (далее – Временное руководство по испытаниям МАНС), которое включает описание основных принципов и целей проведения испытаний, мер по оценке рисков, квалификации

персонала вовлеченного в испытания, инфраструктуры, коммуникации и обмена данными при проведении ограниченных во времени испытаний нового оборудования, отдельных систем и МАНС в целом [10].

На 103 сессии КБМ прошедшей в мае 2021 года рассмотрел и одобрил отчет по итогам регулятивного обзора (Regulatory Scoping Exercise – RSE), выполненного при активном участии Российской Федерации [11]. Целью исследования было проанализировать состояние нормативно-правовой базы ИМО в отношении эксплуатации автономных судов и определить направления ее дальнейшего развития по данной теме.

В 2021 году на 104 сессии КБМ завершена регуляторная проверка и на первом этапе предложено отдать приоритет рекомендательным руководствам по МАНС [12], чтобы дать возможность судостроительной индустрии уже в ближайшее время приступить к эксплуатации автономных судов, это решение поддерживает РФ. Уже на следующей сессии начнется прикладная работа по разработке международного кодекса по МАНС обязательного характера, что позволит создать правовую основу для использования автономных и дистанционно управляемых судов в международных перевозках (разработка кодекса МАНС намечена к 2025 году).

Автономное судовождение в мире

Во всем мире большое внимание государств обращено на развитие программ автономного судовождения на уровне внутренних водных путей. Имеются европейские исследовательские проекты, такие как:

- Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks (MUNIN) (проект Европейского союза, инициированный гамбургским Центром морской логистики имени Фраунгофера) в переводе Морская беспилотная навигация посредством сетей с высокоразвитой логикой. Основной целью проекта являлось создание и проверка концепции автономного судна работающего под контролем берегового оператора [13];

- Advanced Autonomous Waterborne Applications Initiative (AWAA) с компанией Rolls-Royce проект по исследованию автономных приложений на водном транспорте реализованный при финансовой поддержке общественного агентства поддержки инноваций Business Finland (в управлении министерства занятости и экономики Финляндии) и его продолжение - исследовательский проект SVAN (безопасное судно с автономной навигацией). Основной целью проекта AWAA являлась подготовка основы для первого коммерческого использования судов с дистанционным и автономным управлением [14];

Одним из лидеров и основоположником развития автономного судовождения является Норвегия. Департамент морского транспорта Норвегии совместно с Управлением по каботажному плаванию, Федерацией норвежской промышленности и ведущим научно-исследовательским центром Marintek (Norwegian Marine Technology Research Institute) запустил специальный проект Norwegian Forum for Autonomous Ships (NFAS, Норвежский форум по

развитию автономных судов) [15]. NFAS объединяет частные и государственные компании, исследовательские организации и институты, которые разрабатывают общую национальную стратегию технологического развития и коммерческого использования автономных судов.

Значимой вехой в развитии автономного судовождения стал норвежский, полностью на электродвижении, контейнеровоз Yara Birkeland, оснащенный оборудованием Kongsberg Maritime. Yara Birkeland совершивший 19 ноября 2021 года свой первый рейс (рис.1).



Рис. 1. Первый в мире контейнеровоз с системой автономного управления Yara Birkeland совершил 19 ноября 2021 года свой первый рейс

Электрород Yara Birkeland, был разработан в сотрудничестве с Kongsberg Group (KONGSBERG). Судно построено VARD при финансовой поддержке Енова и полностью запущено в коммерческую эксплуатацию с 2022 года. Сейчас, начинается двухлетний период испытаний технологии, которая сделает судно автономным и оно получит сертификат автономного контейнеровоза [16].

Автономное судовождение в РФ

В России путь к практической реализации автономного судовождения имеет комплексный подход, включающий создание технологии и оборудования для оснащения судов различных типов и назначения, создание нормативно-правовой базы для эксплуатации автономных судов, создание технических требований к классификации, постройке и эксплуатации.

В существующей ситуации, в действующем международном правовом поле, Россия придерживается принципа полной функциональной эквивалентности, когда происходит выполнение всех функций судовождения предписанных к исполнению экипажем на борту действующим законодательством, независимо от способов управления судном, в том числе с использованием автономного и дистанционного управления.

Этот принцип позволяет использовать новые технологии в рамках действующих международных конвенций без внесения в них изменений.

В России начиная с 2019 г. при поддержке Министерства промышленности и торговли РФ (далее – Минпромторг), при участии Министерства транспорта РФ (далее – Минтранс) и Российского морского регистра судоходства России (далее – РС), реализуется крупнейший проект в области автономного судовождения - опытно-конструкторская работа «Безэкипажное

судовождение на судах коммерческого флота» (далее - БЭС-КФ) [17]. Проект нацелен на создание технических и правовых условий для широкой эксплуатации автономных коммерческих судов под флагом РФ. Была поставлена задача максимально быстро приблизиться к практическим результатам.

Значимым результатом исполнения проекта стали полномасштабные морские испытания судов в работающих в автономных режимах, с дальнейшей перспективой возможности оснащения системой автономного судовождения судов, которые уже находятся в эксплуатации. Опытная эксплуатация морских автономных судов должна стать самой масштабной в мире, учитывая точечность зарубежных проектов.

В рамках реализации проекта был разработан ряд документов правового и технического регулирования, для снятия барьеров в части применения автономного судовождения в РФ.

Основным документом национального регулирования на основе принципа полной функциональной эквивалентности должен стать федеральный закон «О внесении изменений в Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части правоотношений, возникающих при использовании автономных судов» [18]. Законопроектом предлагается внести изменения в отдельные законодательные акты Российской Федерации с тем, чтобы на национальном уровне определить правовые механизмы использования автономных судов на морских и внутренних водных путях. Одним из важнейших нормативных документов дающим право на опытную эксплуатацию МАНС стало Постановление правительства (далее - Постановление) принятое в конце 2020 года, позволяющее любой судоходной компании оснастить судно под российским флагом системой автономного управления и использовать в рамках эксперимента в реальной коммерческой деятельности [19]. Срок окончания эксперимента 2025 год обусловлен тем, что КБМ ИМО на 104 сессии подтвердил планы по разработке постоянного международного законодательства, кодекса МАНС к 2025 году.

После выхода Постановления, Росморречфлотом были опубликованы Рекомендации по применению Международных правил предотвращения столкновения судов 1972 года (МППСС-72) автономными судами в рамках проведения эксперимента по опытной эксплуатации автономных судов под Государственным флагом Российской Федерации (далее – Рекомендации Росморречфлота) [20] ставшие первым в мировой практике официальным разъяснением морской администрации по применению МППСС-72 в алгоритмическом и математическом виде для эксплуатации МАНС.

В Рекомендациях Росморречфлота приведены базовые понятия используемые при расхождении судна в автономном режиме, определены дистанции зон и сценарии (алгоритмы) расхождения. Всего выделяется десять различных сценариев расхождения, в зависимости от взаимного расположения, скорости судов и соответствия требованиям МППСС-72. Применимость конкретного сценария определяется путем оценки критериев: условий видимости, возможности собственного

судна маневрировать скоростью, возможности собственного судна увеличить скорость, дистанции до цели, курсового угла на цель, разности курса собственного судна и цели, разности скорости собственного судна и цели. Далее предлагается подобрать маневр путем последовательного перебора вариантов применяемого сценария до удовлетворительного результата. Если после перебора всех вариантов удовлетворительный результат не найден, судно должно перейти на ручное управление и в случае если в течение 3 минут переход на ручное управление не выполнен, уменьшить ход до минимального.

В опубликованных РС Положениях по классификации МАНС регламентируются особенности технического наблюдения за проектированием и постройкой МАНС, переоборудованием существующих судов в МАНС, а также изготовлением материалов и изделий. Среди ключевых разделов – системы обеспечения ситуационной осведомленности, средства радиосвязи и обмена данными, навигации и маневрирования, судовая энергетическая установка. Положения непосредственно после вступления в силу были применены в рамках оснащения системами автономного судовождения судов различного типа и различного назначения трех судоводных компаний: «Совкомфлот», «Росморпорт» и группа "Пола Райз".

РС также опубликовал Руководство по обеспечению кибербезопасности [21], документ, регламентирующий требования по снижению рисков при эксплуатации судов, оборудованных компьютеризированными системами. Своевременный документ в рамках развития автономного судовождения, как для вновь построенных МАНС, так и для судов, оснащаемых оборудованием различных степеней автономности.

В рамках выполнения БЭС-КФ, головной исполнитель – «Ситроникс КТ» создал автономную навигационную систему, НПП «Авиационная и морская электроника» и НИИ Специальных проектов – разработали оптическую систему анализа ситуационной обстановки, морские университеты, участвующие в выработке решений алгоритмических решений, совместно с экспертами судоводных компаний стали разработчиками алгоритмов расхождения на основе Рекомендаций Росморречфлота. Минпроторг осуществил финансовую поддержку проекта, Минтранс, обеспечил работу с нормативной базой и продвижение за рубежом, взаимодействие с ИМО и отдельными странами. Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ совместно с компанией «Космическая связь», российским государственным оператором спутниковой связи, участвуют в проектах автономного судовождения предоставляя канал связи на безвозмездной основе.

В результате выполнения БЭС-КФ разработчиками создан комплекс, состоящий из автономной навигационной системы, которая работает с картами, получает навигационные данные от автоматической идентификационной системы, от радиолокационной станции и от оптической системы анализа ситуационной обстановки способной распознавать и анализировать навигационную

обстановку. Данные с этих устройств и систем интегрируются, они видны оператору на пульте дистанционного управления, своего рода ходовом мостике за пределами судна. Модуль автономной навигационной системы, отвечающий за математику и алгоритмы расхождения, определяет опасные объекты предлагая судоводителю маневры для расхождения в соответствии с требованиями МППСС-72, которые отражены в Рекомендациях Росморречфлота.

Стоит отдельно упомянуть об оптической системе анализа ситуационной обстановки [22]. Эта система состоит из набора камер, которые дают картинку обзора на 360 градусов и позволяют видеть то, что видит человек глазами и человек с биноклем, так как камера дальнего обзора видит на дистанцию в 12 морских миль. Система распознает различные низкоконтрастные и разноразмерные объекты на больших дистанциях. В процессе испытаний судов, участвующих в эксперименте, в постоянном режиме происходило обучение системы технического зрения на основе искусственных нейронных сетей, с целью точного определения типа встречного судна, его курса и скорости относительно воды.

Для движения судна в автономном режиме оператор на пульте управления формирует маршрут. При наличии на судоводных путях других судов, которые система определяет, как опасные объекты, система предлагает маневры расхождения в соответствии с МППСС-72. На существующем этапе, рекомендуемые маневры одобряются или не одобряются капитаном, так как в соответствии с международным правом только капитан может принимать решения по управлению судном. При одобрении маневра судно меняет курс, совершая маневр. В дистанционном режиме судно управляется джойстиком, с возможностью переключения на ручной режим. Разработанный программно-аппаратный комплекс предназначен для движения в открытом море и не предназначен для движения в порту, узкостях, реках и каналах. В рамках требований проекта БЭС-КФ суда могут управляться автономно и дистанционно только в открытом море.

Сегодня, системами автономного судовождения БЭС-КФ оборудованы суда коммерческого флота трех судоводных компаний: танкер «Михаил Ульянов» «Совкомфлота» в Арктике, дноуглубительный караван Росморпорта – грунтоотвозная шаланда «Рабочая» и земснаряд «Редут» в Черном и Азовском морях (см. рис.2), сухогруз «Пола Анфиса» группы «Пола Райз» в Черном море (см. рис.3). Суда управляются автономно и дистанционно под наблюдением экипажа. Это не только следование по маршруту, но и расхождение с другими судами [23].

РС одобрил применение технологии автономного и дистанционного судовождения БЭС-КФ на период проведения эксперимента по опытной эксплуатации автономных судов, предусмотренных Постановлением. Одобрение РС выдано главному разработчику проекта – компании «Кронштадт Технологии» (сейчас «Ситроникс КТ») [24]. Одобрено полнофункциональный комплекс автономного судовождения. Это первое в России и в мире одобрение, выданное классификационным обществом на применение полнофункционального комплекса автономного судовождения. Одобрение

РС распространяется на суда, участвующие в национальном эксперименте по эксплуатации автономных судов под Государственным Флагом РФ. При этом, до момента подтверждения возможности применения технологии и выполнения требований, предписанных в Положениях по классификации МАНС, применение системы автономного судовождения на судах с классом РРС, не участвующих в эксперименте, не допускается [25].



Рис. 2. Грунтоотвозная шаланда «Рабочая», оборудованная системой а-Навигации Sitronics KT, управляемая с борта земснаряда «Редут» в автоматическом режиме



Рис. 3. Т/х «Пола Анфуса», оборудованный системой а-Навигации Sitronics KT, управляемый специалистами из петербургского офиса группы «Пола Райз» в дистанционном режиме

Опытно-конструкторская работа БЭС-КФ завершилась демонстрационными рейсами в конце 2021 года, многое сделано для технического и технологического прорыва в области автономного судовождения. Положено начало формированию правового и нормативного регулирования в рамках юрисдикции России, в соответствии и в продолжении инициатив ИМО. В последующих проектах по освоению и внедрению технологий автономного судовождения учитывается опыт, накопленный при воплощении БЭС-КФ и решаются возникшие критические задачи.

Одной из главных критических задач нерешенных до конца, является математическое обеспечение технических средств автономного судовождения и в частности, доработка алгоритмов автоматического расхождения и повышение надежности принятия решений автономной навигационной системой в соответствии с требованиями Рекомендаций Росморречфлота по применению МППСС-72.

По этой проблеме высказался директор департамента судостроения и морской техники Минпромторга, осуществляющего финансовую поддержку БЭС-КФ Б.А.Кабаков 17 ноября 2021 на отраслевой конференции «Автономное судовождение»: «Фактор, замедляющий наше движение вперед - это алгоритмика, это искусственный интеллект, это создание программного обеспечения направленного на соблюдение судном МППСС-72» [26].

БЭС-КФ стал первым шагом к автономному судовождению, продолжая эту работу с 2022 года в России стартовал проект-маяк «Автономное судовождение» в рамках инициативы «Маяки развития технологий», реализуемой во исполнение Указа Президента РФ от 21.07.2020 № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года».

Технические средства БЭС-КФ были нацелены на навигацию в открытом море и ограничены в применении в портах, реках, узкостях и иных стесненных условиях. Причиной этого являются значительно более высокие требования к точности позиционирования судов в стесненных условиях и при швартовке, чем в открытых акваториях. В связи с этим, в рамках проекта-маяка «Автономное судовождение» выполняется опытно-конструкторская работа «Разработка системы автономного судовождения в порту (БЭС-СП)» (далее – БЭС-СП). Разработка системы автономного судовождения позволит решать задачи анализа навигационной обстановки, оценки навигационных опасностей, маневрирования во избежание навигационных опасностей, контроля и управления техническими средствами судна для обеспечения автономного судовождения от причала к причалу, в том числе высокоточной проводки крупнотоннажных судов в стесненных акваториях, в первую очередь, в морских портах. При этом, система автономного судовождения будет иметь возможность использования как на транспортных судах, так и на портовых средствах - азимутальных буксирах-автоматах. На базе БЭС-СП будут реализовываться ключевые этапы проекта-маяка «Автономное судовождение».

Первый этап реализации проекта-маяка «Автономное судовождение», выполнение опытно-

конструкторской работы «Модернизация системы координированного управления и системы управления техническими средствами судна», в результате выполнения которой с 2024 года должна стартовать эксплуатация оснащенных системами автономного судовождения паромов Росморпорта «Маршал Рокоссовский» (см. рис. 4) и «Генерал Черняховский» (проект CNF19M). В настоящее время паром «Маршал Рокоссовский» с марта 2022 года эксплуатируется на линии «Усть-Луга – Балтийск», паром «Генерал Черняховский» с октября 2022 года вышел на линию «Усть-Луга – Калининград» - это сегодня основные для России стратегические паромные линии в Балтийском море, обеспечивающие поставки грузов в Калининградскую область минуя территории третьих стран.



Рис. 4. Т/х «Маршал Рокоссовский»

Для присвоения паромам автономного класса, согласно требованиям Положения по классификации МАМС, необходимо модернизировать систему координированного управления и систему управления техническими средствами судна. Модернизация обеспечит присвоение класса паромам проекта CNF19M не ниже RCMC-MCDS – дистанционное управление с возможностью перехода на ручное при движении в море и ручное управление с поддержкой принятия решения при проходе узкостей и входе в порт. Комплексом систем для автономной навигации паромы оснастит «Sitronics КТ». Согласно контракта с «Росморпортом» работы должны быть завершены в июле 2023 года. Для контроля и управления судами в порту Усть-Луга будет развернут первый в России береговой центр дистанционного управления [27].

Второй этап реализации проекта-маяка «Автономное судовождение», выполнение опытно-конструкторской работы «Разработка системы управления и проектирование буксира-автомата» [28] в результате выполнения которой с 2027 года намечено начало эксплуатации автономного портового флота. При разработке системы управления буксиров-автоматов должны быть учтены функциональные требования пилотного порта – Новороссийского морского торгового порта и результаты БЭС-СП. Будут построены две группы

буксиров-автоматов для обслуживания автономных и традиционных судов в морском порту Новороссийск.

В рамках проекта-маяка «Автономное судовождение» требуется создать инфраструктуру обеспечения автономного судовождения, в том числе развертывание сетей беспроводной связи в акваториях портов, разработать систему управления движением судов нового поколения, оснащенную комплексом оптического видеонаблюдения и анализа в режиме реального времени.

Заключение

1. Мировое сообщество при участии России, в последние годы предпринимало решительные шаги по развитию автономного судовождения, как перспективного средства для повышения уровня безопасности мореплавания и снижения эксплуатационных расходов.

2. РФ становится лидером в области национального регулирования эксплуатации МАМС, придерживаясь принципа полной функциональной эквивалентности, дающего возможность эксплуатации автономных судов в рамках действующих международных конвенций, что открывает перспективы обновления флота РФ на новых принципах XXI века.

3. Результатом проводимых в РФ работ по автономному судовождению должна стать готовность использования отечественного оборудования систем автономного судовождения на судах различных типов и назначения под флагом РФ.

4. Несмотря на то, что в рамках проекта БЭС-КФ оборудование системы автономного судовождения было установлено как дополнительное, без изменения класса судна, в рамках национального эксперимента по опытной эксплуатации автономных судов, оборудование системы автономного судовождения будет устанавливаться на борту как готовое вспомогательное оборудование, одобренное РС и добавляющее символ автономности к классу судна.

5. В перспективе до 2025 года перед РФ стоит стратегическая задача обеспечения готовности технологий и национального законодательства в осуществлении эксплуатации автономных судов в соответствии с международными правилами, регулируемые кодексом МАМС (MASS), принятому в разработку ИМО к 2025 году.

6. Для реализации проекта-маяка «Автономное судовождение» создан консорциум (временное объединение участников проекта) с участием оператора проекта, судовладельцев и производителей оборудования. Есть все основания, что сложнейшие задачи, поставленные в рамках проекта-маяка будут реализованы, а результаты интегрированы в единый комплекс для начала коммерческой эксплуатации автономных судов под флагом РФ.

Литература

1. Allianz: "Shipping losses remain at historic lows, but Covid, mega-ship, supply chain and climate challenges loom large". — Текст : электронный // Allianz Global Corporate & Specialty : [сайт]. — URL: <https://www.agcs.allianz.com/news-and-insights/news/safety-shipping-review-2021-press.html> (дата обращения: 04.10.2022).

2. Jiri, d. V. The Impact of Autonomous Ships on Safety at Sea – A Statistical Analysis / d. V. Jiri. — Текст : электронный // The Impact of Autonomous Ships on Safety at Sea – A Statistical Analysis - ScienceDirect : [сайт]. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832021001113?via%3Dihub> (дата обращения: 10.11.2021).
3. Greiner, Richard Ship operating costs: Current and future trends / Richard Greiner. — Текст : электронный // moore-greece.gr : [сайт]. — URL: <https://www.moore-greece.gr/MediaLibsAndFiles/media/greeceweb.moorestephens.com/Documents/1-Richard-Greiner.pdf> (дата обращения: 27.11.2021).
4. Россия в пятерке лидеров ведущих поставщиков рабочей силы на флот. — Текст : электронный // РОССИЙСКИЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ СОЮЗ МОРЯКОВ АФФИЛИРОВАННЫЙ ЧЛЕН ITF : [сайт]. — URL: http://www.sur.ru/news/lent/2021-11-26/rossija_v_pjaterke_liderov_vedushhikh_postavshhikov_rabochej_sily_na_flot_20716/ (дата обращения: 04.10.2022).
5. Slow steaming – a viable long-term option?. — Текст : электронный // WÄRTSILÄ TECHNICAL JOURNAL : [сайт]. — URL: <https://www.wartsila.com/docs/default-source/Service-catalogue-files/Engine-Services---2-stroke/slow-steaming-a-viable-long-term-option.pdf> (дата обращения: 04.10.2022).
6. Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС). — Санкт-Петербург : РМРС, 2020. — 60 с. — Текст : непосредственный.
7. Maritime Safety Committee (MSC), 98th session, 7-16 June 2017. — Текст : электронный // Maritime Safety Committee (MSC), 98th session, 7-16 June 2017 : [сайт]. — URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-98th-session.aspx> (дата обращения: 05.11.2021).
8. Maritime Safety Committee (MSC), 100th session, 3-7 December 2018. — Текст : электронный // Maritime Safety Committee (MSC), 100th session, 3-7 December 2018 : [сайт]. — URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-100th-session.aspx> (дата обращения: 15.11.2021).
9. Maritime Safety Committee (MSC), 101 session, 5-14 June 2019. — Текст : электронный // Maritime Safety Committee (MSC), 101 session, 5-14 June 2019 : [сайт]. — URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-101st-session.aspx> (дата обращения: 15.11.2021).
10. INTERIM GUIDELINES FOR MASS TRIALS, MSC.1/Circ.1604. — Текст : электронный // INTERNATIONAL REGISTRIES : [сайт]. — URL: <https://www.register-iri.com/wp-content/uploads/MSC.1-Circ.1604.pdf> (дата обращения: 27.11.2021).
11. Maritime Safety Committee, 103rd session (MSC 103). — Текст : электронный // Maritime Safety Committee, 103rd session (MSC 103) : [сайт]. — URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-103rd-session.aspx> (дата обращения: 15.11.2021).
12. Maritime Safety Committee (MSC), 104th session, 4-8 October 2021. — Текст : электронный // Maritime Safety Committee (MSC), 104th session, 4-8 October 2021 : [сайт]. — URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-104th-session.aspx> (дата обращения: 15.11.2021).
13. Welcome to the MUNIN Project web page. — Текст : электронный // MUNIN – Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks : [сайт]. — URL: <http://www.unmanned-ship.org/munin/> (дата обращения: 20.11.2021).
14. AAWA project introduces the project's first commercial ship operators. — Текст : электронный // Rolls-Royce - AAWA project introduces the project's first commercial ship operators : [сайт]. — URL: <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2016/pr-12-04-2016-aawa-project-introduces-projects-first-commercial-operators.aspx> (дата обращения: 10.11.2021).
15. Norwegian Forum for Autonomous Ships. — Текст : электронный // NFAS | Autonomous | Ship Unmanned Smart ships : [сайт]. — URL: <https://nfas.autonomous-ship.org/> (дата обращения: 10.11.2021).
16. Yara to start operating the world's first fully emission-free container ship. — Текст : электронный // Yara : [сайт]. — URL: <https://www.yara.com/corporate-releases/yara-to-start-operating-the-worlds-first-fully-emission-free-container-ship/> (дата обращения: 24.11.2021).
17. КОНКУРСНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ на проведение открытых конкурсов в электронной форме на право заключения государственных контрактов на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, реализуемых в рамках подпрограммы «Развитие судостроительной науки» государственной программы Российской Федерации «Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений». — Текст : электронный // КД№4 (ОКР БЭС-КФ) 070_09-ГП-25.07эк.docx : [сайт]. — URL: https://tender-race.ru/userfiles/files_n18hf16/file_36567165.docx.html (дата обращения: 10.11.2021).
18. Проект федерального закона «О внесении изменений в Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части правоотношений, возникающих при использовании автономных судов». — Текст : электронный // Исследовательский центр частного права имени С.С.Алексеева при Президенте Российской Федерации : [сайт]. — URL: https://privlaw.ru/wp-content/uploads/2020/12/6.-Проект-ФЗ_-Кодекс-торгового-мореплавания-РФ.pdf (дата обращения: 20.11.2021).
19. Постановление Правительства Российской Федерации от 05.12.2020 г. № 2031 "О проведении эксперимента по опытной эксплуатации автономных судов под Государственным флагом Российской Федерации". —

- Текст : электронный // Правительство России : [сайт]. — URL: <http://government.ru/docs/all/131362/> (дата обращения: 20.11.2021).
20. Рекомендации по применению Международных правил предотвращения столкновения судов 1972 года (МППСС-72) автономными судами в рамках проведения эксперимента по опытной эксплуатации автономных судов под Государственным флагом Российской Федерации. — Текст : электронный // Министерство транспорта Российской Федерации ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО МОРСКОГО И РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА (Росморречфлот) : [сайт]. — URL: https://morflot.gov.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/morskoy_flot/rekomendatsii_po_primeneniyu_mejdunarodnyih_pравил_predotvrascheniya_stolknoveniya_sudov_1972_goda_mppss-72_avtonomnyimi_sudami/f3806.html (дата обращения: 20.11.2021).
 21. РУКОВОДСТВО ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ. — Санкт-Петербург : РМРС, 2021. — 46 с. — Текст : непосредственный.
 22. Перспективы автономного судовождения в России: "Аппетит приходит во время еды" Источник: https://www.korabel.ru/news/comments/perspektivy_avtonomnogo_sudovozhdeniya_v_rossii_appetit_prihodit_vo_vremya_edy_2.html. — Текст : электронный // Перспективы автономного судовождения в России: "Аппетит приходит во время еды" Источник: https://www.korabel.ru/news/comments/perspektivy_avtonomnogo_sudovozhdeniya_v_rossii_appetit_prihodit_vo_vremya_edy_2.html : [сайт]. — URL: https://www.korabel.ru/news/comments/perspektivy_avtonomnogo_sudovozhdeniya_v_rossii_appetit_prihodit_vo_vremya_edy_2.html (дата обращения: 10.12.2021).
 23. КОРЕНЕВ, А. С. АВТОНОМНОЕ СУДОВОЖДЕНИЕ НА ДЕЙСТВУЮЩИХ СУДАХ / А. С. КОРЕНЕВ, А. С. СКРЫПКА, С. П. ХАБАРОВ. — Текст : непосредственный // МОРСКОЙ ВЕСТНИК. — 2022. — № 1 (81). — С. 92-95.
 24. РС принципиально одобрил технологию автоматического и дистанционного судовождения. — Текст : электронный // РС принципиально одобрил технологию автоматического и дистанционного судовождения : [сайт]. — URL: <https://rs-class.org/news/general/rs-printsipialno-odobril-tehnologiyu-avtomaticheskogo-i-distantionnogo-sudovozhdeniya/> (дата обращения: 05.11.2021).
 25. Технологический комплекс «БЭС-КФ», разработанный «Кронштадт Технологии», одобрен РС. — Текст : электронный // Российское судоходство, отраслевой портал : [сайт]. — URL: <https://rus-shipping.ru/ru/prof/news/?id=42915> (дата обращения: 20.11.2021).
 26. 17 ноября 2021 Отраслевая конференция «Автономное судовождение». — Текст : электронный // Youtube : [сайт]. — URL: <https://www.youtube.com/watch?v=but7Q9j6jF8> (дата обращения: 20.11.2021).
 27. Sitronics КТ продемонстрировала технологию автономного судовождения для паромов. — Текст : электронный // Sitronics КТ продемонстрировала технологию автономного судовождения для паромов : [сайт]. — URL: <https://sitronics-kt.ru/news/188/> (дата обращения: 30.07.2022).
 28. ИГК Маяк-СУ-БА.docx. — Текст : электронный // Закупка 0173100009521000196 Москва на площадке Группа ЕЭТП Росэлторг - СИНАПС : [сайт]. — URL: <https://synapsenet.ru/zakupki/fz44/0173100009521000196%231--moskva-okr-razrabotka-sistemi-upravleniya-i> (дата обращения: 17.11.2021).

References

1. Allianz: "Shipping losses remain at historic lows, but Covid, mega-ship, supply chain and climate challenges loom large". — Текст : электронный // Allianz Global Corporate & Specialty : [сайт]. — URL: <https://www.agcs.allianz.com/news-and-insights/news/safety-shipping-review-2021-press.html> (дата обращения: 27.11.2021).
2. Jiri, d. V. The Impact of Autonomous Ships on Safety at Sea – A Statistical Analysis / d. V. Jiri. — Текст : электронный // The Impact of Autonomous Ships on Safety at Sea – A Statistical Analysis - ScienceDirect : [сайт]. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832021001113?via%3Dihub> (дата обращения: 10.11.2021).
3. Greiner, Richard Ship operating costs: Current and future trends / Richard Greiner. — Текст : электронный // mooregreece.gr : [сайт]. — URL: <https://www.mooregreece.gr/MediaLibsAndFiles/media/greeceweb.moorestephens.com/Documents/1-Richard-Greiner.pdf> (дата обращения: 27.11.2021).
4. Rossiya v pyaterke liderov vedushchikh postavshchikov rabochey sily na flot [Russia is among the top five leading suppliers of labor for the fleet]. — Текст : электронный // ROSSIYSKIY PROFESSIONAL "NYY SOYUZ MORYAKOV AFFILIROVANNYY CHLEN ITF : [сайт]. — URL: http://www.sur.ru/ru/news/lent/2021-11-26/rossija_v_pyaterke_liderov_vedushchikh_postavshchikov_rabochej_sily_na_flot_20716/ (дата обращения: 30.11.2021).
5. Slow steaming – a viable long-term option?. — Текст : электронный // WÄRTSILÄ TECHNICAL JOURNAL 02.2010 : [сайт]. — URL: <https://www.wartsila.com/docs/default-source/Service-catalogue-files/Engine-Services---2-stroke/slow-steaming-a-viable-long-term-option.pdf> (дата обращения: 10.11.2021).
6. Polozheniya po klassifikatsii morskikh avtonomnykh i distantsionno upravlyaemykh nadvodnykh sudov (MANS) [Regulations for Classification of Maritime Autonomous and Remotely Controlled Surface Ships (MASS)]. — Санкт-Петербург : РМРС, 2020. — 60 с. — Текст : непосредственный.
7. Maritime Safety Committee (MSC), 98th session, 7-16 June 2017. — Текст : электронный // Maritime Safety Committee (MSC), 98th session, 7-16 June 2017 : [сайт]. — URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-98th-session.aspx> (дата обращения: 05.11.2021).

8. Maritime Safety Committee (MSC), 100th session, 3-7 December 2018. — Tekst : ehlektronnyy // Maritime Safety Committee (MSC), 100th session, 3-7 December 2018 : [sayt]. — URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-100th-session.aspx> (data obrashcheniya: 15.11.2021).
9. Maritime Safety Committee (MSC), 101 session, 5-14 June 2019. — Tekst : ehlektronnyy // Maritime Safety Committee (MSC), 101 session, 5-14 June 2019 : [sayt]. — URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-101st-session.aspx> (data obrashcheniya: 15.11.2021).
10. INTERIM GUIDELINES FOR MASS TRIALS, MSC.1/Circ.1604. — Tekst : elektronnyy // INTERNATIONAL REGISTRIES : [sayt]. — URL: <https://www.register-iri.com/wp-content/uploads/MSC.1-Circ.1604.pdf> (data obrashcheniya: 27.11.2021).
11. Maritime Safety Committee, 103rd session (MSC 103). — Tekst : ehlektronnyy // Maritime Safety Committee, 103rd session (MSC 103) : [sayt]. — URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-103rd-session.aspx> (data obrashcheniya: 15.11.2021).
12. Maritime Safety Committee (MSC), 104th session, 4-8 October 2021. — Tekst : ehlektronnyy // Maritime Safety Committee (MSC), 104th session, 4-8 October 2021 : [sayt]. — URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-104th-session.aspx> (data obrashcheniya: 15.11.2021).
13. Welcome to the MUNIN Project web page. — Tekst : ehlektronnyy // MUNIN – Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks : [sayt]. — URL: <http://www.unmanned-ship.org/munin/> (data obrashcheniya: 20.11.2021).
14. AAWA project introduces the project's first commercial ship operators. — Tekst : ehlektronnyy // Rolls-Royce - AAWA project introduces the project's first commercial ship operators : [sayt]. — URL: <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2016/pr-12-04-2016-aawa-project-introduces-projects-first-commercial-operators.aspx> (data obrashcheniya: 10.11.2021).
15. Norwegian Forum for Autonomous Ships. — Tekst : ehlektronnyy // NFAS | Autonomous | Ship Unmanned Smart ships : [sayt]. — URL: <https://nfas.autonomous-ship.org/> (data obrashcheniya: 10.11.2021).
16. Yara to start operating the world's first fully emission-free container ship. — Tekst : elektronnyy // Yara : [sayt]. — URL: <https://www.yara.com/corporate-releases/yara-to-start-operating-the-worlds-first-fully-emission-free-container-ship/> (data obrashcheniya: 24.11.2021).
17. KONKURSNAYA DOKUMENTATSIYA na provedenie otkrytykh konkursov v ehlektronnoi forme na pravo zaklyucheniya gosudarstvennykh kontraktov na vypolnenie nauchno-issledovatel'skikh i opytно-konstruktorskikh rabot, realizuemyykh v ramkakh podprogrammy «Razvitie sudostroitel'noi nauki» gosudarstvennoi programmy Rossiiskoi Federatsii «Razvitie sudostroeniya i tekhniki dlya osvoeniya shelf'ovykh mestorozhdenil». — Tekst : ehlektronnyy // KDN№4 (OKR BEHS-KF) 070_09-GP-25.07ehk.docx : [sayt]. — URL: https://tender-race.ru/userfiles/files_n18hf16/file_36567165.docx.html (data obrashcheniya: 10.11.2021).
18. Proekt federal'nogo zakona «O vnesenii izmeneniy v Kodeks torgovogo moreplavaniya Rossiyskoy Federatsii i otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiyskoy Federatsii v chasti pravootnosheniy, vznikayushchikh pri ispol'zovanii avtonomnykh sudov» [Draft federal law "On amendments to the Merchant Shipping Code of the Russian Federation and certain legislative acts of the Russian Federation in terms of legal relations arising from the use of autonomous ships"]. — Tekst : elektronnyy // Issledovatel'skiy tsentr chastnogo prava imeni S.S.Alekseeva pri Prezidente Rossiyskoy Federatsii : [sayt]. — URL: https://privlaw.ru/wp-content/uploads/2020/12/6.-Proekt-FZ_-Kodeks-torgovogo-moreplavaniya-RF.pdf (data obrashcheniya: 20.11.2021).
19. Postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 05.12.2020 g. № 2031 "O provedenii eksperimenta po opytной ekspluatatsii avtonomnykh sudov pod Gosudarstvennym flagom Rossiyskoy Federatsii" [Decree of the Government of the Russian Federation of 05.12.2020 No. 2031 "On conducting an experiment for the trial operation of autonomous ships under the State flag of the Russian Federation"]. — Tekst : elektronnyy // Pravitel'stvo Rossii : [sayt]. — URL: <http://government.ru/docs/all/131362/> (data obrashcheniya: 20.11.2021).
20. Rekomendatsii po primeneniyu Mezhdunarodnykh pravil predotvrashcheniya stolknoveniya sudov 1972 goda (MPPSS-72) avtonomnymi sudami v ramkakh provedeniya eksperimenta po opytной ekspluatatsii avtonomnykh sudov pod Gosudarstvennym flagom Rossiyskoy Federatsii [Recommendations for the Application of the International Rules for the Prevention of Collisions of Ships of 1972 (COLREGs-72) by autonomous vessels in the framework of the experiment on the trial operation of autonomous vessels under the State flag of the Russian Federation]. — Tekst : elektronnyy // Ministerstvo transporta Rossiyskoy Federatsii, FEDERAL "NOE AGENTSTVO MORSKOGO I RECHNOGO TRANSPORTA (Rosmorrechflot) : [sayt]. — URL: https://morflot.gov.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/morskoy_flot/rekomendatsii_po_primeneniyu_mejdun_ardnyih_pравil_predotvrashcheniya_stolknoveniya_sudov_1972_goda_mppss-72_avtonomnymi_sudami/f3806.html (data obrashcheniya: 20.11.2021).
21. RUKOVODSTVO PO OBESPECHENIYU KIBERBEZOPASNOSTI [GUIDELINES ON CYBER SAFETY]. — Sankt-Peterburg : RMRS, 2021. — 46 s. — Tekst : neposredstvennyy.
22. Perspektivy avtonomnogo sudovozhdeniya v Rossii: "Appetit prikhodit vo vremena edy" Istochnik: https://www.korabel.ru/news/comments/perspektivy_avtonomnogo_sudovozhdeniya_v_rossii_appetit_prihodit_v_o_vremya_edy_2.html. — Tekst : ehlektronnyy // Perspektivy avtonomnogo sudovozhdeniya v Rossii: "Appetit prikhodit vo vremena edy" Istochnik: https://www.korabel.ru/news/comments/perspektivy_avtonomnogo_sudovozhdeniya_v_rossii_appetit_prihodit_v_o_vremya_edy_2.html : [sayt]. — URL: https://www.korabel.ru/news/comments/perspektivy_avtonomnogo_sudovozhdeniya_v_rossii_appetit_prihodit_v_o_vremya_edy_2.html (data obrashcheniya: 10.12.2021).

23. KORENEV, A. S. AVTONOMNOE SUDOVOZHDENIE NA DEISTVUYUSHCHIKH SUDAKH / A. S. KORENEV, A. S. SKRYPKA, S. P. KHABAROV. — Tekst : neposredstvennyi // MORSKOI VESTNIK. — 2022. — № 1 (81). — S. 92-95.
24. RS printsipial'no odobril tekhnologiyu avtomaticheskogo i distantsionnogo sudovozhdeniya. — Tekst : ehlektronnyy // RS printsipial'no odobril tekhnologiyu avtomaticheskogo i distantsionnogo sudovozhdeniya : [sayt]. — URL: <https://rs-class.org/news/general/rs-printsipialno-odobril-tekhnologiyu-avtomaticheskogo-i-distantsionnogo-sudovozhdeniya/> (data obrashcheniya: 05.11.2021).
25. Tekhnologicheskii kompleks «BES-KF», razbotannyy «Kronshtadt Tekhnologii», odobren RS [Technological complex "BES-KF", developed by "Kronstadt Technologies", approved by the RS]. — Tekst : ehlektronnyy // Rossiyskoe sudokhodstvo, otraslevoy portal : [sayt]. — URL: <https://rus-shipping.ru/ru/prof/news/?id=42915> (data obrashcheniya: 20.11.2021).
26. 17 noyabrya 2021 Otrasleyaya konferentsiya «Avtonomnoe sudovozhdenie» [November 17, 2021 "Autonomous Navigation" Industry Conference]. — Tekst : ehlektronnyy // Youtube : [sayt]. — URL: <https://www.youtube.com/watch?v=but7Q9j6jF8> (data obrashcheniya: 20.11.2021).
27. Sitronics KT prodemonstrirovala tekhnologiyu avtonomnogo sudovozhdeniya dlya paromov. — Tekst : ehlektronnyy // Sitronics KT prodemonstrirovala tekhnologiyu avtonomnogo sudovozhdeniya dlya paromov : [sayt]. — URL: <https://sitronics-kt.ru/news/188/> (data obrashcheniya: 30.07.2022).
28. IGK Mayak-SU-BA.docx. — Tekst : ehlektronnyy // Zakupka 0173100009521000196 Moskva na ploshchadke Gruppy EЕНТР Rosehtorg - SINAPS : [sayt]. — URL: <https://synapsenet.ru/zakupki/fz44/0173100009521000196%231--moskva-okr-razrabotka-sistemi-upravleniya-i> (data obrashcheniya: 17.11.2021).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Михаил Анатольевич Москаленко, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры технологии и организации судоремонта, «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского» (МГУ им. адм. Г.И. Невельского), 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50А, e-mail: asmsh@rambler.ru

Mikhail A. Moskalenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Head of the Department of Technology and Ship Repair Organization, MSU named after adm. G.I. Nevelskoy, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Verhneportovaya Str., 50A, Vladivostok, 690003, Russian Federation, e-mail: asmsh@rambler.ru

Станислав Евгеньевич Черняхович, научный сотрудник, «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского» (МГУ им. адм. Г.И. Невельского), 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50А, e-mail: sboats@mail.ru

Stanislav E. Cherniakhovich, research associate, MSU named after adm. G.I. Nevelskoy, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Verhneportovaya Str., 50A, Vladivostok, 690003, Russian Federation, e-mail: sboats@mail.ru

Игорь Игоревич Пушкарёв, аспирант, «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского» (МГУ им. адм. Г.И. Невельского), 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50А, e-mail: b_r_i_g88@mail.ru

Igor I. Pushkarev, graduate student, MSU named after adm. G.I. Nevelskoy, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Verhneportovaya Str., 50A, Vladivostok, 690003, Russian Federation, e-mail: b_r_i_g88@mail.ru

Алексей Валерьевич Титов, кандидат технических наук, проректор по цифровизации, инновациям и приоритетным проектам, Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева (АГУ им. В.Н.Татищева), 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, titov@asu.edu.ru

Alexey V. Titov, Ph.D. (Eng), Vice-Rector for Digitalization, Innovations and Priority Projects, Astrakhan State University name of V.N. Tatishcheva, Tatishcheva St., 20a, Astrakhan, 414056, Russian Federation, titov@asu.edu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.12.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 22.12.2022.

Научная статья

УДК 629.12

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.002>

Особенности нормативных подходов к малым судам

А.Г. Назаров¹ anmarineconsulting@ya.ru

¹АН Марин Консалтинг, г.Москва, Россия

Аннотация. Малые суда широко используются для отдыха, коммерческой деятельности, служебных целей и рыболовства и являются самостоятельной и многочисленной группой судов. Если говорить о нормативной практике, такие суда находятся в «серой зоне» международного регулирования и требования к ним в разных странах существенно отличаются. В работе анализируется само понятие малого судна исходя из определения длины, пассажировместимости, района плавания. Рассмотрена структура требований к малым судам различного назначения в ряде юрисдикций. Подчеркивается важность создания нормативных ниш малых судов для российского рынка, что позволит создать условия для кратного увеличения числа строящихся судов, в первую очередь для внутренних пассажирских перевозок. На основе выполненного анализа сформулированы предложения по корректировке отечественной нормативной базы.

Ключевые слова: малые суда, нормирование

Для цитирования: Назаров А.Г. особенности нормативных подходов к малым судам, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 29—37. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.002

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.002>

Specifics of normative approaches to small ships

Albert G. Nazarov¹ anmarineconsulting@ya.ru

¹AN Marine Consulting, Moscow, Russian Federation

Abstract. Small ships are widely used for recreation, commercial activities, special purposes and fishing and are an independent and numerous group of vessels. Talking about regulatory practice, such vessels are in the "gray zone" of international regulation and the requirements for them differ significantly in different countries. The paper analyzes the very concept of a small ship based on the definition of length, passenger capacity, navigation area. The structure of requirements for small craft for various purposes in a number of jurisdictions is considered. The importance of creating regulatory niches for small ships for the Russian market is emphasized, which will create conditions for a multiple increase in the number of ships constructed, primarily for domestic passenger transportation. On the basis of the analysis performed, proposals for improvement the domestic regulatory documents have been formulated.

Keywords: small ships, regulations

For citation: Albert G. Nazarov, Specifics of normative approaches to small ships, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 29—37. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.002

Введение

В международной практике, малые суда широко используются для перевозки пассажиров, рекреационных целей и прогулок, рыбного промысла и аквакультуры, а также в качестве служебных судов. В то же время само понятие «малое судно» не всегда определено четко, а требования международных конвенций применимы к ним лишь выборочно. На практике малые суда находятся в "серой зоне" международного регулирования и к ним морскими администрациями и классификационными обществами (КО) могут быть предъявлены любые технические требования: от полного отсутствия таковых, до практически невыполнимых. Это существенно затрудняет работу проектировщиков и производителей таких судов.

В РФ в предыдущие годы значительная часть потребностей в малых судах (в первую очередь прогулочных) и комплектующих покрывалась за счет импорта, что отодвигало проблему их проектирования и постройки на второй план (за исключением, пожалуй, служебных и патрульных катеров). В условиях санкционных ограничений,

промышленность РФ поставлена перед необходимостью самостоятельного производства малых судов разных типов и импортозамещения их комплектующих, что требует локализации малого судостроения в РФ.

Одним из последствий ориентации на импортные суда в предыдущие годы является отставание отечественной нормативной базы малого судостроения. В частности, в РФ отсутствуют специализированные нормы для малых судов пассажирского назначения; к таким судам прогулочного назначения применяются подходы «большого» судостроения, что вызывает неоправданный рост сроков и стоимости постройки, и нельзя признать адекватным.

Правила для прогулочных судов [1,2], навязывают технические решения и процедуры сертификации, делающие суда российского производства неконкурентоспособными. Более того, существует разделение требований в [2] для судов длиной до 6м и судов большей длины; для последних предусмотрена процедура классификации каждого судна индивидуально.

Подобная ситуация с нормативной базой напрямую препятствует развитию и обновлению флота для обеспечения внутренних перевозок, вынуждая эксплуатировать старые суда при невозможности строительства новых (рис.1).

В настоящей статье поставлена цель повышения эффективности отрасли судоходства за счет развития ниши малых судов, для чего решены задачи анализа подходов к определению понятия малого судна, рассмотрен опыт зарубежных стран и РФ, сформулированы предложения по внедрению изменений в российскую нормативную базу. В статье не рассматриваются вопросы совершенствования отдельных технических требований, а внимание уделено формулированию общих подходов к малым судам.



Рис. 1. Малые пассажирские суда: а) – стальной теплоход «Форос-1» постройки 1973 года высаживает людей на необорудованный берег; б) - перспективное пассажирское судно из композиционных материалов с носовой аппарелью пр. AMD1990, в РФ подобные морские суда де-факто запрещены.

Исторический обзор

В справочнике [3], изданном в 1950 году отмечается роль «мелких» судов в народном хозяйстве, приводится толкование понятия «мелкого» судна, и справедливо отмечаются трудности в определении такового исключительно по водоизмещению и мощности механизмов; критериями отнесения к «мелким» судам является наибольшая длина до 30м и водоизмещение до 100 тонн.

Исторически, появление термина «маломерное судно» в СССР связано с положением [4], где впервые в 1982 году было введена Государственная инспекция по маломерным судам, к ведению которой были отнесены: «самоходные суда с главными двигателями мощностью менее 75 л.с. и самоходные суда валовой вместимостью менее 80 регистровых тонн, принадлежащие предприятиям...» а также «принадлежащие гражданам моторные суда

(независимо от мощности двигателей), парусные суда, а также самоходные суда».

В дальнейшем, до 2012 года маломерным считалось самоходное судно валовой вместимостью менее 80 регистровых тонн с мощностью главного двигателя менее 55кВт или подвесными моторами независимо от мощности, парусное самоходное судно валовой вместимостью менее 80 регистровых тонн, иное самоходное судно (гребная лодка грузоподъемностью 100 и более килограммов, байдарка грузоподъемностью 150 и более килограммов и надувное судно грузоподъемностью 225 и более килограммов), прогулочное судно пассажироместимостью не более 12 человек независимо от мощности главного двигателя (главных двигателей) и от валовой вместимости.

Таким образом, исторически в России маломерные суда не были ограничены по длине, и некоторое время - по пассажироместимости; допускалось их коммерческое применение в рамках регистрации ГИМС [4].

Определение малого судна

Ответ на вопрос «что такое малое судно?» неоднозначен. В настоящее время определение «малости» зависит в первую очередь от длины, и иногда - от пассажироместимости судна и прочих факторов. Начнем с того, что на практике в качестве длины судна используются разные величины.

Длина L , которую часто называют «классификационной», т.к. подобное определение используется ИМО и КО. В этом случае длина судна L – это большее из а) 96 % полной длины по ватерлинии, проходящей на высоте 85 % наименьшей теоретической высоты борта и б) длина от передней кромки форштевня до оси баллера руля по той же ватерлинии.

Длина корпуса L_n , определяется, например, согласно ISO8666 [5]. Судно с длиной корпуса $L_n < 24$ м фактически может иметь максимальную длину, на несколько метров превышающую 24м за счет установленных на механическом креплении кормовых платформ и даже носовых свесов – например, это очень распространенная ситуация при сертификации рекреационных судов в ЕС.

Стандарты 20м диапазона

В РФ согласно ФЗ-36 [6] с 2012 года законодательно закреплён термин «маломерное судно» - судно, длина которого не должна превышать 20 метров и общее количество людей на котором не должно превышать 12. Такое же определение содержится в Техническом регламенте ТР026 [2], статье 7 КТМ [7] и статье 3 КВВТ [8]. Однако само определение длины в этих документах не раскрывается.

Следуя ФЗ-36, российские КО ввели соответствующие правила для коммерческих маломерных судов. Правила классификации и освидетельствований маломерных судов Российского морского регистра судоходства (РС) [9] распространяются на маломерные суда, длина L_n которых не превышает 20м и общее количество людей на которых не превышает 12, где длина L_n – это длина корпуса (наибольшая), исключая все детали, которые могут быть демонтированы неразрушающим способом, но включая элементы,

используемые для гидростатического или гидродинамического поддержания. Аналогичный документ присутствует и у Российского классификационного общества (РКО) [10], но в качестве границы 20м используется наибольшая длина по ГОСТ 1062-80 [11].

Пожалуй, единственный международный документ, в котором используется граница «малости» 20м – это европейские правила плавания по внутренним водным путям CENVI [12], где термин «малое судно» означает любое судно с корпусом длиной менее 20м без учета руля и бушприта, за исключением буксиров, составов, судов, перевозящих более 12 пассажиров, паромов и толкаемых барж.

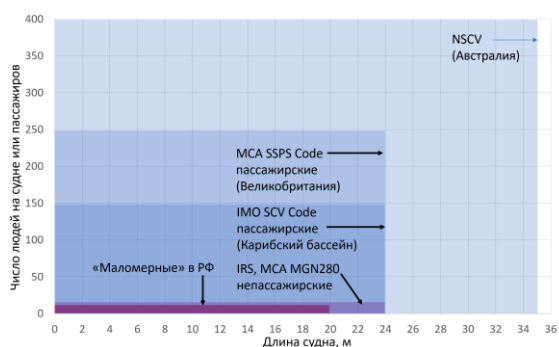


Рис. 2. Нормативные ниши малых коммерческих судов.

Стандарты 24м диапазона по классификационной длине

Ряд нормативных документов устанавливают нижнюю границу применения требований для «больших» судов, таким образом относятся все остальные к «малым». Так, IMO использует нижний предел 24м по классификационной длине L в конвенциях о грузовой марке и тоннажу судов [13], [14]. Из-за неприменения ряда конвенций к малым судам их иногда называют «не конвенционными», хотя ряд более новых конвенций, например SOLAS, не содержит подобных исключений.

Аналогично, Европейская директива 2009/45/ЕС для пассажирских судов [15] устанавливает нижнюю границу применимости требований в 24м по классификационной длине L , а группа стандартов ISO Large Yachts устанавливает длину L «больших яхт» как превышающую 24м.

С другой стороны, кодекс для малых коммерческих судов карибского бассейна SCV Code [16], разработанный IMO, использует определение малого коммерческого судна по длине $L=5...24$ м перевозящих от 13 до 150 бескаютных пассажиров или до 50 каютных пассажиров, и совершающих рейсы не далее 20 миль от убежища.

Морские администрации ряда государств напрямую устанавливают границу 24м по L , вводя формальное определение «малые коммерческие суда» и «малые суда». В частности, морская администрация Великобритании (MCA) [17,18] устанавливает для малых судов длину 24м по L , исключая их этой группы судов некоторые суда технического флота и перевозящие опасные грузы.

Индийский регистр (IRS) [19] выпустил правила для малых судов не прогулочного назначения для $L<24$ м, а морской администрацией Индии

применяется руководство [20] для прогулочных судов, не более 12 пассажиров и мощностью двигателей не более 3000кВт, допускающее их коммерческое использование. Правила DNV [21] устанавливают определение малого рабочего судна исходя из длины $L<24$ м и количества пассажиров/персонала на борту не более 12 человек.

У РС присутствуют правила для малых рыболовных судов [22] с L до 24м. В правилах РС о грузовой марке [23] суда до 24м выделены в отдельную группу требований. Интересно отметить, что у РКО [24] используется граница 25м по наибольшей длине; таким образом создается определённый «допуск» на свесы и выступающие элементы.



Рис. 3. Судно рекреационное судно пр. SY60 (проект АНМК) и его табличка строителя по CE.

Стандарты 24м диапазона по длине корпуса

Стандарты группы ISO Small Craft изначально были предназначены для рекреационных судов, однако в более поздних изданиях стандартов предусматриваются суда и для профессионального использования. Малое судно определено по критерию $L_n<24$ м, при этом длина корпуса определяется стандартом ISO8666. Аналогичный стандарт введен также в РФ как ГОСТ Р 58738-2019 [25]. Европейская директива по рекреационным судам RCD [26] применяется к судам с $L_n<24$ м. Аналогично, правила РС для прогулочных судов [1] также содержат определение де-факто малого судна $L_n<24$ м, а также ограничения по количеству людей на борту.

Стандарт DNV0342 [27] определяет малые суда по принципу $L_n\leq 24$ м; стандарт предназначен для судов коммерческого назначения длиной от 6 до 24м и скоростью до 45 узлов, количество людей на борту не ограничивается.

Стандарт VTT [28] разработан в Финляндии на базе стандартов группы ISO Small Craft с необходимой адаптацией для коммерческих судов. Стандарт определяет малое судно как $L_H=5.5...24м$, не ограничивая пассажировместимость.

Прочие стандарты

Следует отметить, что формальное определение малого судна присутствует не во всех юрисдикциях. Например, в Австралии формально такого определения нет, но для пассажирских, служебных и

рыболовных применяется тщательно продуманная градация требований в зависимости от длины и района плавания; в различных разделах стандарта NSCV [29] для применения упрощенных требований применяются градации длины до 13м, до 25м и до 35м. Общий подход таков, что суда длиной свыше 35м высших категорий должны полностью соответствовать международным конвенциям.

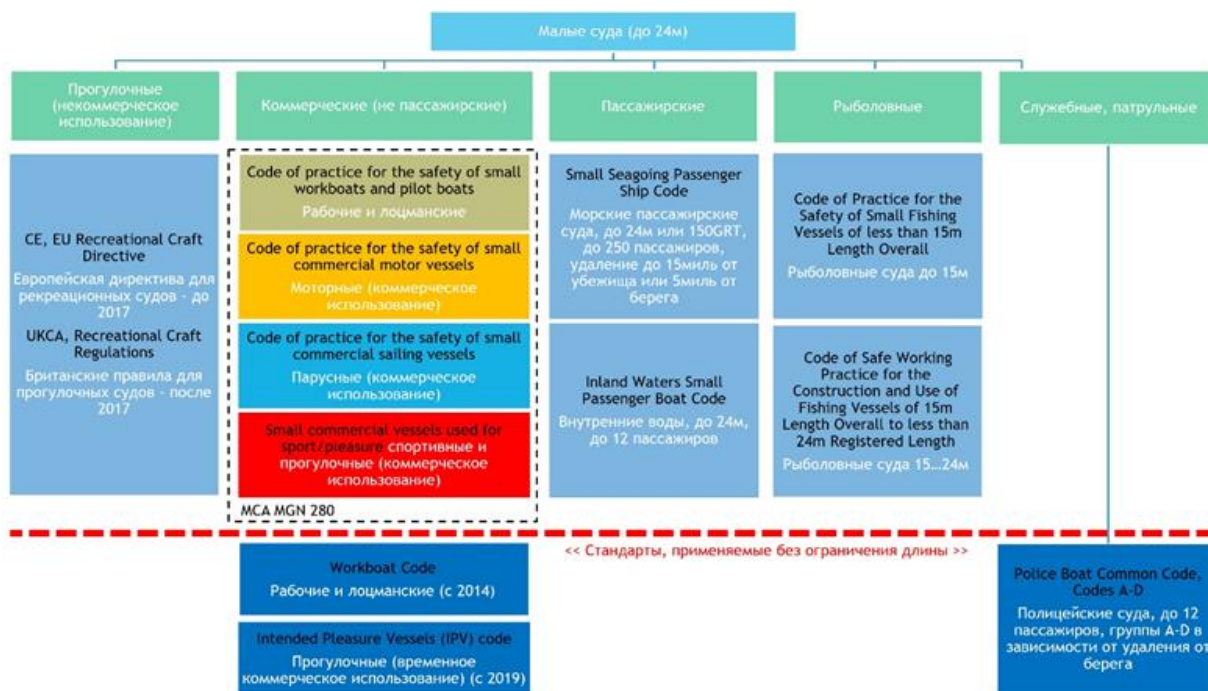


Рис. 4. Структура нормативной базы для малых судов в Великобритании

В целом, границы нормативных ниш малых и маломерных коммерческих судов можно представить в виде областей на рис.2. Как можно заметить, существующая российская нормативная ниша маломерных коммерческих судов очень узкая и именно поэтому она представляет незначительный коммерческий интерес. С другой стороны, ниша в таком виде стимулирует нелегальные перевозки с превышением пассажировместимости на маломерных судах.

Практика CE для рекреационных судов

По существующей практике Евросоюза прогулочные суда с длиной корпуса $L_H < 24м$ называются «рекреационными», причем эти же суда допущены для использования в коммерческом чартере, прокате, обучении и т.д. Для рекреационных судов количество людей на борту не ограничивается 12 человеками, и согласно директиве RCD [26] все люди на борту судна считаются «экипажем». Это соответствует реальности для таких судов: контролировать превышение «пассажирского лимита» рекреационного судна невозможно, если судовладелец организует на борту вечеринку или корпоративное мероприятие. В подобной ситуации, разумнее проверить безопасность судна для ожидаемого и физически возможного количества

людей, чем устанавливать несоблюдаемые барьеры. На рис.3 представлен катамаран пр. SY60, которому при CE-сертификации были присвоены несколько категорий плавания и вместимости (обычная практика для судов с сертификатом CE). Высшая категория судна А назначается исходя из «экипажа» в 12 человек. Однако в прибрежных выходах (категория С или D) на судне может находиться до 20 или 30 человек. Остойчивость и остальные параметры безопасности проекта проверены на указанную вместимость. За рубежом для подобных судов предусмотрена процедура типового одобрения, вместо предусмотренной в РФ по [1,2] классификации.

Малые суда в Великобритании

Интересен анализ требований к малым судам за рубежом, в частности в Великобритании как стране, обладающей развитой морской отраслью. В части судов прибрежного плавания, Морскую администрацию Великобритании представляет МСА (Maritime Coastguard Agency), которая издает руководства по техническому надзору и правилам эксплуатации судов (рис.3). Следует заметить, что некоторая запутанность системы обусловлена постепенностью введения документов. Так, для коммерческих малых судов были введены четыре

руководства, имеющих оригинальную цветовую кодировку: «коричневое» для рабочих судов, «желтое» для моторных судов, «синее» для парусных и «красное» для прогулочных, используемых в коммерческих целях. Кроме того, существует документ, называемый MGN280, который описывает альтернативные стандарты для всех четырех «цветных» групп судов. «Коричневое» руководство было введено в 1998 году, но с 2014 года есть возможность использования нового документа

[30], где ограничения по длине отсутствуют при сохранении упрощенного характера требований. Такая же ситуация с новым руководством IPV 2019 [31] года для прогулочных судов, временно используемых в коммерческих целях. Это было сделано под давлением отрасли, для возможности постройки более эффективных и мореходных судов большей длины, например, судов для обслуживания морских ветроустановок.

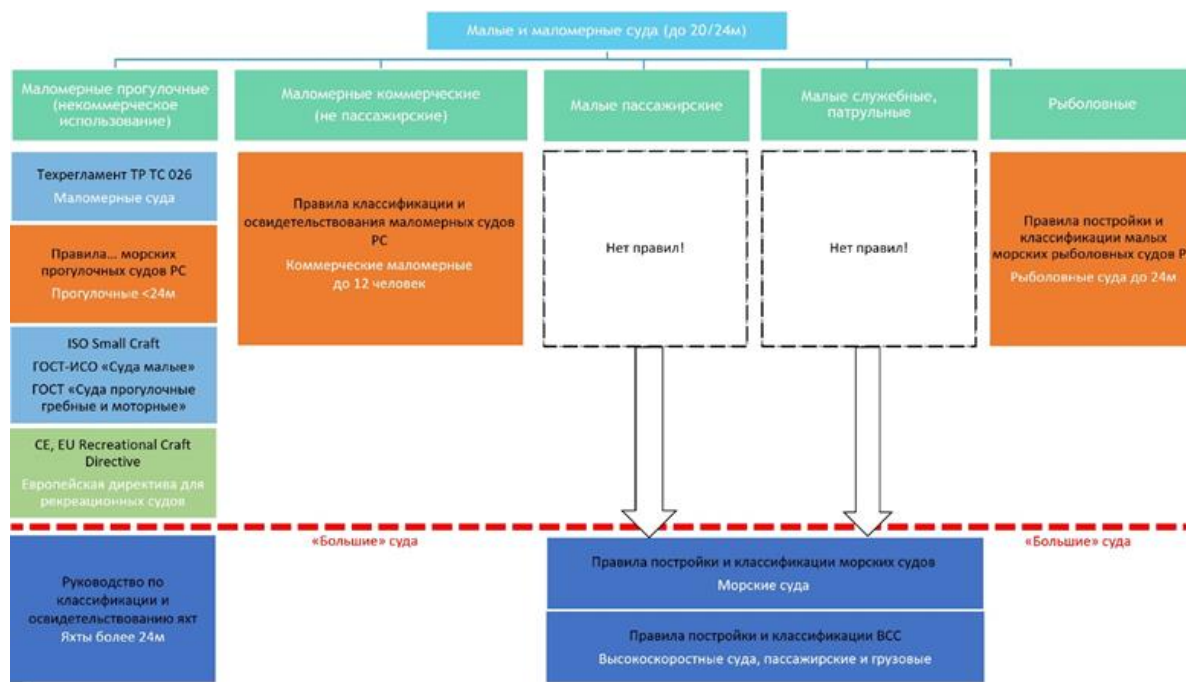


Рис. 5. Структура нормативной базы для малых и маломерных судов в РФ

Интересным документом является руководство SSPS [17] для морских пассажирских судов, которое частично выводит их из-под действия ряда международных конвенций. SSPS предъявляет к ним упрощенные требования, ограничивая удаление от берега и метеоусловия, при разрешенной пассажироместимости до 250 человек.

Требования к малым рыболовным судам еще более дифференцированы и содержатся в двух руководствах – для судов до 12м и для судов 12...24м длиной.

Прогулочные суда в Великобритании ранее регулировались Европейской директивой RCD [26], а после 2017 года – национальными британскими правилами; при этом применяемые стандарты полностью идентичны стандартам группы ISO Small Craft.

Таким образом, в Великобритании (кроме судов, перевозящих опасные грузы и технического флота), существуют нормативные ниши малых судов, а длина 24м часто называется «волшебной длиной». Это позволяет проектировать и строить малые суда применяя к ним технические требования, соответствующие специфике судов малого размера. Более того, для некоторых категорий судов эта ниша даже была расширена в сторону больших длин, при сохранении упрощенных требований [30,31].

Малые суда в РФ

Нормативные ниши требований к малым морским судам в РФ сведены в схему на рис.5., где основной акцент сделан на практику РС.

Группа маломерных судов прогулочного назначения (т.е. некоммерческих) регулируется Техническим регламентом ТР ТС026 и документами, на которые он ссылается, в частности на ГОСТ и стандарты группы ISO Small Craft. Имеется практика признания сертификатов CE, выданных согласно европейской директиве RCD. Существуют также малоиспользуемые правила РС для прогулочных судов [1].

Маломерные коммерческие суда регулируются РС и РКО [9,10], однако из-за ограничения в 12 человек на борту эта ниша не может полностью удовлетворить требования рынка к пассажироместимости. В основном, эти суда пригодны для развлекательных прогулок небольших групп туристов в курортных городах и сервисов типа водное такси. На практике они часто эксплуатируются с превышением установленной пассажироместимости.

Таких понятий как малые пассажирские и малые служебные суда в РФ нет, хотя в правилах РКО [24] имеется ряд упрощений в требованиях для пассажирских судов до 25м длиной. РС применяет

свои правила [32,33] для пассажирских судов независимо от длины, а также международные конвенции в полном объеме, хотя это конвенции по определению не предназначены для судов, не совершающих международных рейсов.

Для рыболовных судов малого размера, у российских КО существуют отдельные правила, в частности у РС [22].

Таблица 1

PC морские суда	Россия			ЕС RCD, ISO Small Craft	Великобритания		Австралия NSCV
	PC прогулочные суда	PKO	TP TC 026		MCA пассажирские	MCA не пассажирские	
Неогр.	A	-	0	A	-	0	A
R1	A1	-	I	-	-	1	-
R2	A2	-	II	-	-	-	B
R2-RSN	B	-	III	B	-	2	-
R2-RSN(4.5)	-	-	-	-	-	-	C
R3-RSN	-	М-СП	-	-	-	-	-
-	C	М, М-ПР	IV-1	C	Class B	3	D
R3	-	М-ПР	-	-	-	4	-
-	C1	О-ПР	IV-2	-	Class C	5	-
-	-	О	-	-	-	-	-
-	C2	Р	IV-3	-	Class D	6	E
-	C3	Л	IV-4	-	-	-	-
-	D	-	IV-5	D	-	-	-

Анализ категорий

Для дальнейшего формулирования рамок нормативной ниши малых судов, в табл.1 рассмотрены классы и районы плавания судов. По мнению автора, наибольший интерес для первоочередного развития в РФ представляют следующие нормативные ниши (выделены цветом):

- Малые пассажирские суда прибрежных категорий с удалением 5...20 миль от места убежища и вместимостью до 150 пассажиров.

- Малые прогулочные суда высших категорий в диапазоне 20...24м, в настоящее время не попадающие под определение маломерных судов.

Можно отметить, что малые пассажирские суда, претендующие на упрощенные требования, сгруппированы в области более низких категорий по допустимой высоте волны и удалению от берега/убежища. Так, в SSPS [17] диапазон максимальных высот значительных волн составляет 0,6...2,5м, а удаление от убежища 5...20миль.

Предложения по совершенствованию нормативной базы РФ

По результатам анализа, для внедрения в практику РФ рекомендуются новые подходы к малым судам. Для малых прогулочных судов предлагается ограничивать только длину $L_n \leq 24\text{м}$ и вводить категории по районам плавания. Ограничение максимального количества людей на борту прогулочного судна должно определяться исключительно требованиями к безопасности, без не соблюдаемых в реальности ограничений типа «до 12 пассажиров». Для служебных, рабочих и прочих непассажирских судов, эксплуатируемых профессиональным экипажем, обычно ограничивается длина, количество людей/пассажиров на борту и удаление либо район плавания. Для малых рыболовных судов рационально ограничивать длину и удаление либо район плавания. Для пассажирских судов необходимо

создание нормативной ниши малых пассажирских судов, ограниченных по длине до $L \leq 24\text{м}$, пассажироместности (например, до 150 пассажиров), удалению от берега и/или убежища (5...20миль), допускаемой высоте волнения (например, $H_{3\%} \leq 3\text{м}$).

Заключение

В настоящее время Правительством РФ реализуется ряд государственных программ, направленных на развитие водного транспорта, туризма, технологичных композиционных материалов, что непосредственно затрагивает судостроение. В свете транспортных пассажирских перевозок, особо актуальны становятся пассажирские суда малого размера вместимостью до 50...150 человек, которые могут эксплуатироваться на внутренних водных путях и побережьях морей, включая мелководные районы и при отсутствии причальной инфраструктуры (рис.16).

Опыт зарубежных стран свидетельствует, что существенно улучшить ситуацию с удовлетворением внутреннего спроса может серийное производство малых судов соответствующего назначения, в частности с применением композиционных материалов. Это требует новых подходов в проектировании и совершенствования нормативной базы. При этом, в российской практике на конец 2022 года полностью отсутствует ниша малых пассажирских судов, а существует политика использования КО «больших» правил [32,33] независимо от размера судна, что существенно сдерживает возможности пополнения флота.

Можно утверждать, что существование в РФ специфической ниши маломерных коммерческих судов без адекватной альтернативы в виде ниши «малого пассажирского судна» способствует снижению безопасности судоходства. Так, ограничение по количеству людей на борту маломерного коммерческого судна 12 человекам приводит к тому, что не имеет смысла строить более крупные и как следствие более мореходные суда. В

других случаях, «маломерное судно на 12 человек» эксплуатируется с превышением вместимости. Это означает, что не проверены параметры безопасности судна на возросшее количество людей, на борту отсутствуют спасательные средства в нужном количестве и т.д.

Фактически, маломерные суда являются подмножеством малых судов (рис.2). Таким образом,

не затрагивая ФЗ-36 [6] возможно выделить группу малых судов в нормативной практике РФ. Особое внимание при этом следует обратить на качество нормативной базы малого судостроения РФ, которая должна отвечать современному уровню развития техники.

Литература

1. Правила классификации и постройки прогулочных судов. Российский Морской Регистр Судостроения, НД № 2-020101-110, Санкт-Петербург, 2018.
2. Технический регламент таможенного союза. О безопасности маломерных судов. ТР ТС 026/2012.
3. Емельянов Ю.В., Крысов В.А. Справочник по мелким судам. Судпромгиз, Ленинград, 1950, 396с.
4. Типовое положение о государственной инспекции по маломерным судам союзной республики. Утверждено Постановлением Совета Министров СССР от 16 июля 1982 г. N 667 (с изм. и доп.1987г.).
5. ГОСТ Р ИСО 8666-2012. Суда малые. Основные данные. Москва, 2014.
6. Федеральный закон о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части определения понятия маломерного судна от 23.04.2012 N 36-ФЗ.
7. Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации от 30.04.1999 N 81-ФЗ (ред. от 28.06.2022) (с изм. и доп., вступ. в силу с 09.07.2022).
8. Кодекс внутреннего водного транспорта Российской Федерации от 07.03.2001 N 24-ФЗ (ред. от 14.03.2022).
9. Правила классификации и освидетельствований маломерных судов. Российский Морской Регистр Судостроения, НД № 2-020101-147, Санкт-Петербург, 2021.
10. Руководство по классификации и освидетельствованию маломерных судов. Руководство Р.044-2016, Москва, Российский Речной Регистр, 2016.
11. ГОСТ 1062-80. Размещения надводных кораблей и судов. Главные термины, определения и буквенные обозначения. 1980.
12. CEVNI – European Code for Inland Waterways. ECE/TRANS/SC.3/115/Rev.4 UNITED NATIONS, New York and Geneva, 2009.
13. International Convention on Load Lines, 1966 and Protocol of 1988, as amended in 2003. International Maritime Organization (IMO).
14. International Convention on Tonnage Measurement of Ships, International Maritime Organization (IMO), Adoption: 23 June 1969.
15. Directive 2009/45/EC of the European parliament and of the Council on safety rules and standards for passenger ships, 6 May 2009.
16. Code of Safety for Small Commercial Vessels Operating in the Caribbean. International Maritime Organization, SCV CODE, 2017.
17. The Small Seagoing Passenger Ship Code. The Maritime & Coastguard Agency, 2015.
18. Small Vessels in Commercial Use for Sport or Pleasure, Workboats and Pilot Boats – Alternative Construction Standards. MGN 280 (M), Maritime & Coastguard Agency, 2004.
19. Requirements for Small Crafts (Provisional). Classification Notes, Indian Register of Shipping, 2020.
20. Instructions for Construction, Survey, Certification and Operation of Pleasure Crafts. DGS Order, Directorate of Shipping, India, 2016.
21. Rules of classification for high speed, light craft and naval surface craft. P.5, Ch. 6 Small service craft. DNV, 2015.
22. Правила классификации и постройки малых морских рыболовных судов. Российский Морской Регистр Судостроения, НД № 2-020101-160, Санкт-Петербург, 2022.
23. Правила о грузовой марке морских судов. Российский Морской Регистр Судостроения. НД № 2-020101-128, Санкт-Петербург, 2020.
24. Правила классификации и постройки судов. Российский Речной Регистр, 2019.
25. ГОСТ Р 58738-2019. Суда малые. Основные данные, Москва, 2017.
26. Directive 2013/53/EU Of the European Parliament and of the Council. Recreational craft and personal watercraft and repealing Directive 94/25/EC, 20 November 2013.
27. DNV STANDARD DNV-ST-0342 Craft, 2022
28. Guidelines for Commercial Craft. Version 2016.2. VTT Expert Services Ltd., Finland, 2016.
29. National Standard for Commercial Vessels (NSCV). Part B, General Requirements. Australian Transport Council, 2008.
30. The Workboat Code Edition 3. The Safety of Small Workboats and Pilot Boats – A Code of Practice. Maritime & Coastguard Agency, 2021.
31. The Code of Practice for Intended Pleasure Vessels in Temporary Commercial Use at Sea. Maritime & Coastguard Agency, 2019.
32. Правила классификации и постройки морских судов. Российский Морской Регистр Судостроения, 2022.
33. Правила классификации и постройки высокоскоростных судов. Российский Морской Регистр Судостроения, НД № 2-020101-111, Санкт-Петербург, 2018.

References

1. Pravila klassifikatsii i postroiiki progulochnykh sudov. [Rules for the classification and construction of pleasure craft]. Rossiiskii Morskoi Registr Sudokhodstva, ND № 2-020101-110, Sankt-Peterburg, 2018.
2. Tekhnicheskii reglament tamozhennogo soyuza. O bezopasnosti malomernykh sudov. TR TS 026/2012. [On the safety of small boats].
3. Emel'yanov Y.V., Krysov V.A. Spravochnik po melkim sudam. [Small Crafts Handbook]. Sudpromgiz, Leningrad, 1950, 396p.
4. Tipovoe polozhenie o gosudarstvennoi inspektsii po malomernym sudam soyuznoi respubliki. [Model Regulations on the State Inspectorate for Small Vessels of the Union Republic]. Utverzhdeno Postanovleniem Soveta Ministrov SSSR ot 16 iyulya 1982 g. N 667 (s izm. i dop.1987g.).
5. GOST R ISO 8666-2012. Suda malye. Osnovnye dannye. [Small vessels. Basic data]. Moskva, 2014.
6. Federal'nyi zakon o vnesenii izmenenii v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiiskoi Federatsii v chasti opredeleniya ponyatiya malomernogo sudna ot 23.04.2012 N 36-FZ. [Federal Law No. 36-FZ dated April 23, 2012 on amending certain legislative acts of the Russian Federation regarding the definition of the concept of a small size vessel].
7. Kodeks torgovogo moreplavaniya Rossiiskoi Federatsii ot 30.04.1999 N 81-FZ 7. [Merchant Shipping Code of the Russian Federation No. 81-FZ dated April 30, 1999], (red. ot 28.06.2022) (s izm. i dop., vstup. v silu s 09.07.2022).
8. Kodeks vnutrennego vodnogo transporta Rossiiskoi Federatsii ot 07.03.2001 N 24-FZ. [Code of inland water transport of the Russian Federation of 07.03.2001 N 24-FZ], (red. ot 14.03.2022).
9. Pravila klassifikatsii i osvidetel'stvovanii malomernykh sudov. [Rules for the classification and survey of small craft]. Rossiiskii Morskoi Registr Sudokhodstva, ND № 2-020101-147, Sankt-Peterburg, 2021.
10. Rukovodstvo po klassifikatsii i osvidetel'stvovaniyu malomernykh sudov. [Guidelines for the classification and survey of small vessels]. Rukovodstvo R.044-2016, Moskva, Rossiiskii Rechnoi Registr, 2016.
11. GOST 1062-80. Razmereniya nadvodnykh korablei i sudov. Glavnye terminy, opredeleniya i bukvennye oboznacheniya. [Principal ship dimensions. Main terms, definitions and symbols]. 1980.
12. CEVNI – European Code for Inland Waterways. ECE/TRANS/SC.3/115/Rev.4 UNITED NATIONS, New York and Geneva, 2009.
13. International Convention on Load Lines, 1966 and Protocol of 1988, as amended in 2003. International Maritime Organization (IMO).
14. International Convention on Tonnage Measurement of Ships, International Maritime Organization (IMO), Adoption: 23 June 1969.
15. Directive 2009/45/EC of the European parliament and of the Council on safety rules and standards for passenger ships, 6 May 2009.
16. Code of Safety for Small Commercial Vessels Operating in the Caribbean. International Maritime Organization, SCV CODE, 2017.
17. The Small Seagoing Passenger Ship Code. The Maritime & Coastguard Agency, 2015.
18. Small Vessels in Commercial Use for Sport or Pleasure, Workboats and Pilot Boats – Alternative Construction Standards. MGN 280 (M), Maritime & Coastguard Agency, 2004.
19. Requirements for Small Crafts (Provisional). Classification Notes, Indian Register of Shipping, 2020.
20. Instructions for Construction, Survey, Certification and Operation of Pleasure Crafts. DGS Order, Directorate of Shipping, India, 2016.
21. Rules of classification for high speed, light craft and naval surface craft. P.5 Ch.6 Small service craft. DNV, 2015.
22. Pravila klassifikatsii i postroiiki malykh morskikh rybolovnykh sudov. [Rules for the classification and construction of small sea fishing vessels]. Rossiiskii Morskoi Registr Sudokhodstva, ND № 2-020101-160, Sankt-Peterburg, 2022.
23. Pravila o gruzovoi marke morskikh sudov. [Rules on the cargo line of sea vessels]. Rossiiskii Morskoi Registr Sudokhodstva. ND № 2-020101-128, Sankt-Peterburg, 2020.
24. Pravila klassifikatsii i postroiiki sudov. [Rules for the classification and construction of ships]. Rossiiskii Rechnoi Registr, 2019.
25. GOST R 58738-2019. Suda malye. Osnovnye dannye. [Small vessels. Basic data]. Moskva, 2017.
26. Directive 2013/53/EU Of the European Parliament and of the Council. Recreational craft and personal watercraft and repealing Directive 94/25/EC, 20 November 2013.
27. DNV STANDARD DNV-ST-0342 Craft, 2022
28. Guidelines for Commercial Craft. Version 2016.2. VTT Expert Services Ltd., Finland, 2016.
29. National Standard for Commercial Vessels (NSCV). Part B, General Requirements. Australian Transport Council, 2008.
30. The Workboat Code Edition 3. The Safety of Small Workboats and Pilot Boats – A Code of Practice. Maritime & Coastguard Agency, 2021.
31. The Code of Practice for Intended Pleasure Vessels in Temporary Commercial Use at Sea. Maritime & Coastguard Agency, 2019.
32. Pravila klassifikatsii i postroiiki morskikh sudov. [Rules for the classification and construction of ships]. Rossiiskii Morskoi Registr Sudokhodstva, 2022.
33. Pravila klassifikatsii i postroiiki vysokoskorostnykh sudov. [Rules for the classification and construction of high-speed crafts]. Rossiiskii Morskoi Registr Sudokhodstva, ND № 2-020101-111, Sankt-Peterburg, 2018.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Альберт Георгиевич Назаров, кандидат технических наук, FRINA, CEng, MSNAME, директор конструкторского бюро «АН Марин Консалтинг», 107113, Москва, ул. Шумкина, д.20, с.1, офис 501/502, e-mail: anmarineconsulting@ya.ru

Albert G. Nazarov, Ph.D. (Eng.), FRINA, CEng, MSNAME, Director of the design bureau "AN Marine Consulting", Shumkina str., 20, p.1, office 501/502, Moscow, 107113, Russian Federation, e-mail: anmarineconsulting@ya.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.11.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.01.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 25.01.2023.

Научная статья

УДК 629.5.061.11

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.003>

Выбор типа и геометрических характеристик судовых рулей: анализ современных проектных решений

К.В. Плотников¹ plotnikov@smtu.ru, Д.С. Долгов¹ dolgov_dmitriy_spb@mail.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье на основе обширного статистического материала и обзора публикаций выполнен анализ проектных решений, характерных для современных рулевых устройств морских транспортных и промысловых судов. Проанализированы основные работы, касающиеся новых конструктивных решений для судовых рулей. По информации из открытых источников и имеющейся документации собраны данные о количестве рулей, типе руля по количеству и расположению его опор. Показано, что для транспортных судов наиболее популярны в настоящее время подвесные балансирные рули, в то время как в начале 90-х гг. проектанты чаще отдавали предпочтение полубалансирным рулям. Отмечено, что балкеры остаются единственным типом грузовых судов, где полубалансирные рули популярнее подвесных. Для 110 морских судов собраны данные по геометрии судовых рулей и расположению их относительно гребного винта, геометрии кормового подзора. Данные о площади судовых рулей сопоставлены с имеющимися в литературе формулами. Показано, что рекомендации DNV являются наиболее универсальными. Формулу из Правил Регистра СССР 60-х гг., давно утратившую актуальность, авторы предлагают использовать для оценки площади рулей с закрылком. Приведены средние значения относительного удлинения и коэффициента компенсации рулей, полученные в исследовании. Рассмотрена геометрия кронштейнов полуподвесных рулей, даны формулы для её оценки на ранних стадиях проектирования.

Ключевые слова: геометрия судового руля, кронштейн руля, относительное удлинение руля, площадь пера руля, подвесные рули, полубалансирные рули, проектирование рулевого устройства, рулевое устройство судна, судовые рули с круткой

Благодарности: авторы выражают благодарность Сергею Валентиновичу Сутоло за ценные комментарии и магистранту Александру Вячеславовичу Мазнину за помощь в сборе статистических данных

Для цитирования: Плотников К.В., Долгов Д.С. Выбор типа и геометрических характеристик судовых рулей: анализ современных проектных решений, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 38—50. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.003

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.003>

Type and geometry of ship rudders choosing: the analysis of current designs

Kirill V. Plotnikov¹ plotnikov@smtu.ru, Dmitriy S. Dolgov¹ dolgov_dmitriy_spb@mail.ru

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The article contains results of a study based on extensive statistical material and a review of publications of recent decades about ship rudder types and geometry. Authors suppose that the most notable features of modern rudder designs are the twisted leading edge concept and usage of a rudder trunk as a support for full-spade rudders. A brief review of some publications in this field is given. There is a study made to estimate the prevalence of different types of rudders on vessels. Data based on general arrangements drawings was collected and three groups were formed. The first group contained information about rudder types for 150 cargo and passenger ships built in 2017-2020 and second group contained data for 182 ships of similar type built in 1991-1995. The third group was formed with data for modern fishing vessels. It is shown that full-spade rudders are now the common solution for containerships, different kinds of ro-ro and passenger vessels and even for tankers, while in the early 90's designers often preferred semi-spade rudders. The results showed that semi-spade rudders are still popular for bulk carriers design. For 110 sea vessels information about geometry of the ship's rudders and their location relative to the propeller was collected. The data on the area of the ship's rudders was compared with the formulas available in the literature. It is shown that DNV recommendations are the most universal. The formula from the Rules of the Register of the USSR, which has lost its relevance, the authors propose to use to estimate the area of the rudders with a flap. The average values of the relative aspect and balance ratios of the rudders obtained in the study are given. The geometry of rudder horn is considered, formulas for its evaluation at the early stages of design are also given.

Keywords: aspect ratio of a rudder, full-spade rudders, rudder blade area, rudder horn, ship rudder geometry, twisted rudders, semi-spade rudders, ship rudder system, statistical data

Acknowledgments: the authors are grateful to Serge Sutulo from University of Lisbon for some important comments and to master student Alexandr Maznin for his contribution to collection of statistical data

For citation: Kirill V. Plotnikov, Dmitriy S. Dolgov, The type and geometry of ship rudders choosing: the analysis of current designs, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 38—50. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.003

Введение

Выбор типа, геометрических характеристик рулевых устройств и размещение пера руля в кормовом подзоре морского судна на ранних стадиях проектирования связаны с использованием данных судов-прототипов и применением довольно простых рекомендаций эмпирического характера. Помимо параметров, определяющих геометрию руля (площадь пера руля, форма руля в плане, коэффициент компенсации, относительное удлинение, относительная толщина и тип профиля и т.д.) конструктор обычно интересуется такие параметры как расстояние от нижней кромки руля до ОП, верхний зазор между рулём и корпусом, рациональное удаление руля от гребного винта (т.е. расстояние от диска винта до оси вращения руля или его передней кромки), а также заглубление руля, т.е. расстояние от ЛГВЛ до верхней кромки руля. В случае применения полуподвесных рулей интерес представляет относительная высота кронштейна, ширина его петли (петель). Разумеется, любые методы определения этих характеристик являются приближёнными и уточняются, ориентируясь на результаты модельных и натурных испытаний управляемости, а в современной практике – на результаты численного анализа в современных компьютерных пакетах.

Имеющиеся рекомендации по выбору указанных характеристик в отечественной литературе содержатся в монографиях и справочниках [1-4 и др.], а также в некоторых учебных пособиях. Приводимые оценки их применимости на практике основаны в большинстве случаев на данных по судам постройки 70-х гг. и более ранним. Иностранная публикация, отражающая современный опыт выбора характеристик устройства на начальных стадиях, например, [5, 6], сравнительно немногочисленны. Отметим обстоятельное руководство [7], монографию [8] и статью с подробным обзором работ по теме [9], в которых излагаются принципиальные вопросы проектирования рулевых устройств, но статистической информации, касающейся выбранного типа и геометрии рулей существующих судов они практически не содержат.

Цель данной работы – продемонстрировать тенденции, связанные с выбором типа рулевых устройств морских транспортных и промысловых судов, сформулировать простейшие рекомендации по выбору геометрических характеристик перьев рулей и компоновки винторулевых комплексов на начальных стадиях, опираясь на анализ современных проектных решений. Информационная база исследования – проекты судов, строившихся за последние 30 лет, имеющиеся на кафедре конструкции и технической эксплуатации судов СПбГМТУ, журналы [10], а также многочисленные иностранные публикации. В [10] приведены чертежи общего расположения, работа с которыми велась путем ручного масштабирования и прорисовки в САД-системах. Информация об объемах

рассмотренных выборок приведена в соответствующих разделах статьи.

Полученные данные сравнивались с рекомендациями, приведёнными в литературе. Значительная часть данных, приводимых ниже, получена авторами при подготовке нового учебного пособия.

Используемые типы рулей и особенности их конструкции

Выбор типа рулевого устройства (и средств обеспечения управляемости в широком смысле) зависит от типа, размеров и скорости судна, формы корпуса (в первую очередь образований кормы), особенностей его эксплуатации.

На вновь строящихся крупных самоходных морских судах небалансирные рули за рудерпостом последние 20 лет не встречаются даже на линейных ледоколах и экспедиционных судах арктического плавания (см. суда проектов 22220, 10510, 22280, Xue Long 2 и др.). Рули со съёмным рудерпостом, имевшие популярность на морских транспортных судах в прошлом¹, на новых судах, по-видимому, не встречаются.

Традиционно на морских одновинтовых судах большое распространение имеют полуподвесные (полубалансирные) рули с одной или двумя опорами на кронштейн. Этот вариант сочетает удобство монтажа и демонтажа пера руля, сравнительно небольшую требуемую мощность рулевой машины, приемлемый диаметр баллера даже для весьма крупных судов, а также общую надёжность устройства, в т.ч. при посадках на мель и ударах о плавающие предметы и подводные препятствия [2]. В случаях, когда форма образований кормы и размерения судна позволяют изготовить ахтерштевень с подошвой, могут применяться балансирные рули с опорой на пятке ахтерштевня. Подвесные рули в отечественной литературе, см. [1, 2, 5] и др., традиционно рекомендуются для двух- и трехвальных судов, в т.ч. скоростных, кораблей, а также для малых судов.

По крайней мере с конца 80-х и до наших дней происходит процесс внедрения новых конструктивных решений для судовых рулей и пересмотра некоторых из имеющихся рекомендаций. Сформулируем основные причины:

- изменение размерений, формы корпуса, скоростей хода морских судов;
- борьба с кавитацией, эрозионным износом и усталостными повреждениями рулей;
- стремление к энергоэффективности судов, внедрение требований ИМО к коэффициенту энергетической эффективности (EEDI);
- появление винторулевых колонок азимутального типа большой мощности, которые составляют конкуренцию традиционным рулевым устройствам;
- появление и внедрение новых технологий и решений, а также развитие методов численного расчёта в механике.

¹ По данным из [1] более 40% танкеров, сухогрузов и пассажирских судов иностранной постройки в 1968 г. имели такие рули

Рулевые устройства повышенной эффективности достаточно давно в мировой практике стали заказными изделиями, предлагаемыми «под ключ» для каждого конкретного проекта. Как показано в [5], в южнокорейской практике, говоря о выборе типа руля даже довольно простых грузовых судов, фактически оперируют торговыми названиями крупнейших компаний-производителей, прежде всего Becker Marine Systems. По этой причине ниже приведен краткий обзор некоторых наиболее важных концепций в отношении судовых рулей, внедренных в практику в последние 20 лет и влияющих на выбор типа руля.

Одной из основных проблем являются кавитационные повреждения рулей, работающих в потоке за винтом. Они наиболее характерны для судов с высокой относительной скоростью (линейные контейнеровозы, грузопассажирские и пассажирские паромы, суда накатного типа, крупнотоннажные газовозы) и локализуются в районе балансирующей части пера руля [8]. Для полуподвесных рулей существует проблема щелевой кавитации в районе зазора между рулем и кронштейном [11]. Появление концентраторов напряжений за счёт эрозионных дефектов в районе рецесса пера руля может приводить к появлению трещин и потере руля. Предлагались как оригинальные решения вроде средств, блокирующих зазор [12], так и изменение геометрии средств управления, и переход к использованию подвесных рулей.

Последние десятилетия широкое распространение получили рули с несимметричным переменным по высоте (размаху) профилем – рули с круткой (twisted leading edge rudders или twisted

rudders) [13]. Входящая кромка верхней и нижней частей пера руля закручены в противоположные стороны (рис.1).

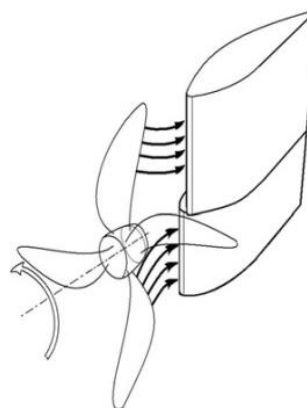


Рис. 1. Руль с геометрической круткой в потоке за винтом [14]

Для рулей, расположенных в потоке за гребным винтом, крутка руля способствует выравниванию поля давлений, что снижает вероятность возникновения кавитации. Кроме того, это приводит к уменьшению индуктивного сопротивления непереложенного руля, уменьшению окружных вызванных скоростей винта, что эквивалентно повышению пропульсивного коэффициента. Геометрия подбирается таким образом, чтобы нейтральный угол перекладки руля в целом был близок к нулю. Применяемые типы крутки судовых рулей показаны на рис.2.

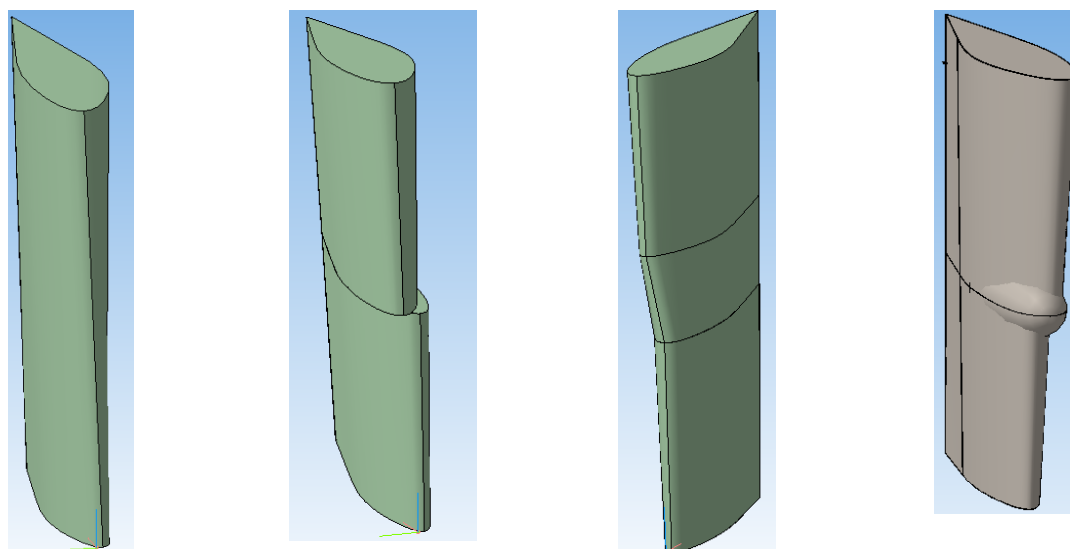


Рис. 2. Типы крутки судовых рулей: а) непрерывная (X-образная) б) с разрывом в) Z-образная г) с грушевидной наделкой в районе разрыва

Непрерывная крутка (рис.2а) была предложена специалистами корейской корпорации Hyundai Heavy Industries [15]. Угол крутки входной кромки составляет $5 \pm 1,5^\circ$, хвостик руля остается симметричным. Эксперименты показывают отсутствие кавитации при углах перекладки менее

10° , в то время как на близких по площади, удлинению и расположению в подзоре полуподвесных рулях возникает кавитация в нижней части входящей кромки и в зазоре петли кронштейна. Скорость рассмотренных контейнеровозов (8000 TEU и 13000 TEU) при применении указанных рулей

возрастает на десятые доли процента, маневренные характеристики несколько улучшаются, например, тактический диаметр уменьшается на 7%-8% (сравнение производится с полуподвесными рулями симметричного профиля аналогичной площади).

В [16] приведены результаты исследований рулей с переменным по высоте руля углом крутки, в т.ч. с наделкой (рис.2в, г) как средства повышения энергоэффективности судна. По сравнению с вариантом, имеющим полуподвесной руль симметричного профиля аналогичной площади, руль с Z-образной круткой позволил увеличить скорость судна длиной 350 м на 0,16 уз за счёт повышения пропульсивного коэффициента на 2,5%.

В [14] и [17] показана методика численного анализа работы рулей с круткой за винтом, причём в [14] реализована программа оптимизации геометрии таких рулей с использованием вычислительной гидромеханики и генетического алгоритма поиска.

Крутка руля приводит к усложнению конструкции руля. Кроме того, обычно такая концепция применяется для подвесных рулей, для которых одной из главных проблем всегда было обеспечение надёжности устройства, т.к. руль представляет собой консольную конструкцию. Традиционно рекомендуется два решения [2]: увеличение протяжённости ступицы пера руля по высоте (рис.3б) или установка её вблизи центра тяжести пера руля. В любом случае, баллер обычно пропускается внутрь подвесных рулей на 25%-60% их высоты. Однако для крупнотоннажных судов с относительно высокими скоростями хода требуемый по условию прочности диаметр баллера подвесного руля при такой схеме крепления обычно превышает 1000 мм, что усложняет его изготовление. Кроме того, подобная конструкция не решает полностью вопрос надёжности устройства при касании пером руля грунта или подводных препятствий.

Компанией Becker Marine Systems была предложена и в 2003 г. запатентована оригинальная конструкция крепления рулей King Rudder Support (KRS) [18]. Гельмпортная труба, представляющая собой отливку, свободно проходит через отверстие в верхнем торцевом листе пера, при этом нижний опорный подшипник баллера располагается внутри пера руля вблизи его центра тяжести (рис.3а). За счёт этого консольная часть гельмпортной трубы фактически выполняет роль кронштейна, расчётное значение изгибающего момента в баллере и, следовательно, его диаметр уменьшаются. Вопрос о том, является ли руль такой конструкции подвесным, дискуссионный. Строго говоря, с точки зрения классификации судовых рулей по количеству и расположению опор такой руль можно отнести к полуподвесным¹. Ещё одно решение того же производителя – полуподвесные полубалансирные рули типа HERUS [19], отличающиеся тем, что к

консольной части гельмпортной трубы приваривается неподвижная профилированная наделка из листового проката, фактически кронштейн. Такие рули являются разновидностью полуподвесных полубалансирных рулей.

В данной работе распространённость на практике различных видов рулей на морских транспортных судах исследовалась следующим образом. Были сформированы две выборки судов из журналов [10], одна включала 182 судна 1991-1995 гг. постройки, а вторая – 150 судов, построенных в 2017-2020 гг. Отбирались только суда, для которых о количестве рулей, их типе и особенностях можно достоверно судить по чертежу общего расположения и описанию в тексте. Большую часть в обеих выборках составили суда шести основных типов (см. табл.1 и 2).

Можно сформулировать следующие выводы:

- в наши дни распространённость на морских судах подвесных балансирных рулей существенно увеличилась по сравнению с началом 90-х гг. (64% от всех рассмотренных судов в выборке судов 2017-2020 гг. против 38% в выборке судов 90-х гг. постройки). Фактически, они являются стандартным решением для современных судов с относительно большой скоростью хода – контейнеровозов, пассажирских и грузопассажирских судов, судов накатного типа, газозовозов (по крайней мере, двухвальных);

- на танкерах распространённость подвесных рулей также значительно увеличилась (61% против 27%);

- навалочные суда оказались единственным из рассмотренных типов судов, для которых полуподвесные (полубалансирные) рули до сих пор являются наиболее распространённым решением;

- рули 56% судов (85 из 150) в выборке судов 2017-2020 гг. имеют обтекаемые наделки (груши Коста), расположенные по оси гребного винта, при этом 55 из них оснащены наделками, доведенными до обтекателя ступицы винта (см.рис 5б);

- 15 судов в выборке 2017-2020 гг. имеют подвесные руль (рули) с закрылком (10% от выборки). Это 5 контейнеровозов, 3 газозова, 2 танкера-продуктовога/химовоза, 1 нефтеналивной танкер, 3 грузопассажирских паромов и 1 накатное судно. В выборке судов 1991-1995 гг. судов с такими рулями оказалось 34 (19% от объёма выборки);

- как минимум около трети всех судов в выборке 2017-2020 гг. имеют те или иные средства повышения эффективности пропульсивного комплекса: преднасадки, крылья-стабилизаторы и т.д.,

- для двухвальных морских судов схема с одним рулём в ДП применяется в настоящее время очень редко: рассмотрено 80 двухвальных судов в двух выборках, и только 2 имеют один руль;

¹ В иностранных публикациях такие рули часто называют full-spade rudders, т.е. подвесными. Ниже при оценке распространённости различных типов рулей такие рули также считались подвесными по крайней

мере в силу того, что на боковом виде чертежа общего расположения судна они визуально идентичны обычным подвесным

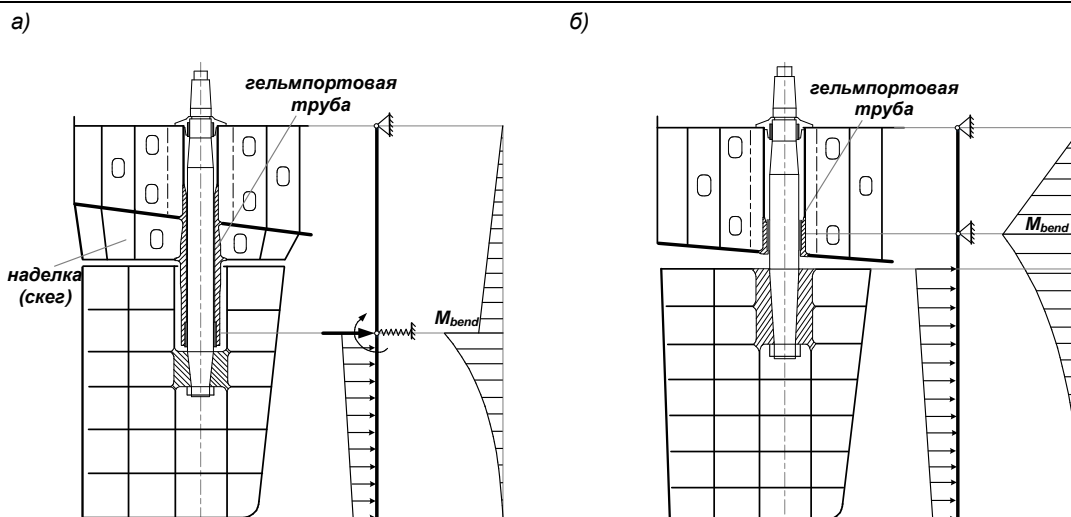


Рис. 3. Принципиальная схема конструкции подвесных рулей, модель для расчёта прочности в балочной идеализации и эпюра изгибающих моментов: а) современное решение с нижней опорой баллера внутри пера руля, б) традиционный подвесной руль

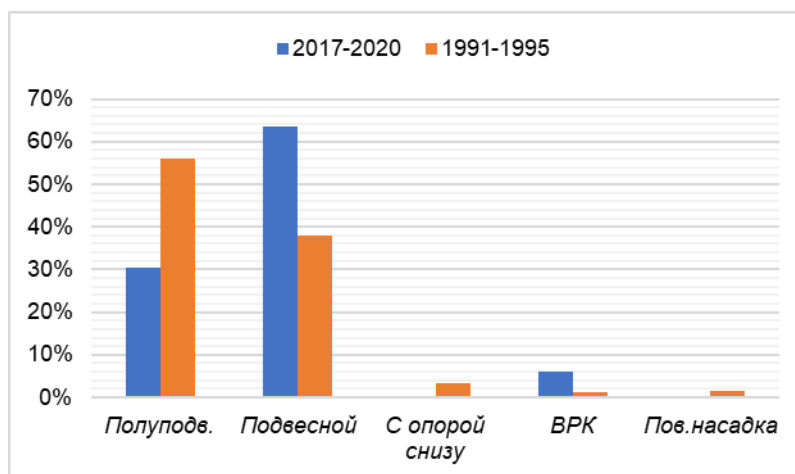


Рис. 4. Гистограмма распределения рулей по типам в рассмотренных выборках

Таблица 1

Данные по типам рулей в выборке судов 2017-2020 г.п.

Тип судна (диапазон дедвейта в тыс. DWT; среднее значение Fr_L)	Кол-во (%) от общего в выборке	Кол-во судов с подвесными рулями (% от общего по типу)	Кол-во судов с полуподвесными рулями (% от общего по типу)	Количество судов с ВРК
Контейнеровозы, рефрижераторы (6,3... 233; 0,21) MPV,	38 (25,2%)	28 (73,7%)	8 (21,1%)	2
Балкеры (34,5...398; 0,15)	17 (11,3%)	3 (17,6%)	14 (82,4%)	-
Танкеры (2,8...321; 0,16)	41 (27,3%)	25 (61%)	14 (34,1%)	2
Газовозы (4,5...99; 0,19)	32 (21,3%)	20 (62,5%)	8 (25%)	4
- в т.ч. одновинтовые	13	8	5	-
- в т.ч. двухвинтовые	19	12	3	4
Пассажирские и грузопассажирские суда (4,9...11,4; 0,26)	13 (8,7%)	11 (84,6%)	1 (7,7%)	1
- в т.ч. одновинтовые	2	1	1	-
- в т.ч. двухвинтовые	11	10	0	1
Ro-Ro, Ro-Lo, автомобилевозы (6,9...27,7; 0,22)	9 (6%)	8 (88,9%)	1 (11,1%)	-

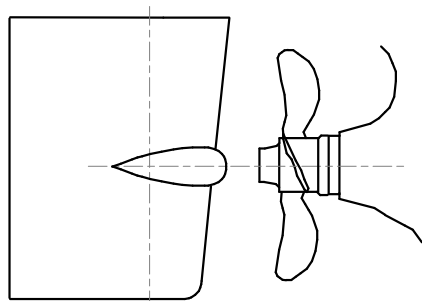
Примечание: здесь и далее MPV – универсальные сухогрузные суда, ВРК – винторулевые полноповоротные колонки, Fr_L – число Фруда по длине

Таблица 2

Данные по типам рулей для шести наиболее распространенных типов судов в выборке 1991-1995 г.г.

Тип судна (диапазон дедвейта в тыс. DWT; среднее значение Fr_L)	Кол-во (% от общего в выборке)	Кол-во судов с подвесными рулями (% от общего по типу)	Кол-во судов с полуподвесными рулями (% от общего по типу)	Количество судов с балансирными рулями с
Контейнеровозы, МРВ, рефрижераторы (2...68; 0,24)	45 (24,7%)	15 (33,3%)	29 (64,4%)	1
Балкеры (7...169; 0,17)	22 (12,1%)	7 (31,8%)	11 (50%)	4
Танкеры (4,6...306; 0,17)	45 (24,7%)	12 (26,7%)	33 (73,3%)	-
Газовозы (5,2...73; 0,21)	12 (6,6%)	3 (25%)	9 (75%)	-
Пассажирские и грузопассажирские суда (0,6...23; - в т.ч. одновинтовые - в т.ч. двухвинтовые)	39 (21,4%)	24 (61,5%)	15 (38,5%)	-
Ro-Ro, Ro-Lo, автомобилевозы (4,2...17,5; 0,26)	8 (4,4%)	5 (62,5%)	3 (37,5%)	-

а)



б)

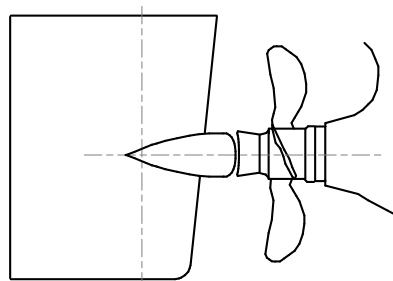


Рис. 5. Типы грушевидных пропульсивных наделок на перьях рулей

- балансирные рули с нижней опорой на пятке ахтерштевня ещё встречались на крупных морских транспортных судах (прежде всего балкерах и универсальных сухогрузных) в 90-х гг., однако, по-видимому, непопулярны на таких судах в настоящее время;

- выполненное исследование не позволяет оценить распространенность рулей с круткой на морских судах – в [10] лишь для 9 судов в выборке 2017-2020 г. присутствует упоминание в тексте о применении этой концепции, визуально судить о крутке руля по приведенным чертежам общего расположения, как правило, невозможно. В то же время, опираясь на зарубежные публикации, можно предположить значительное распространение подвесных рулей с круткой на судах с $Fr_L \geq 0,2$ и некоторое распространение таких рулей на более тихоходных судах.

Кроме того, отметим, сопоставив табл.1 и табл.2, что относительные скорости морских транспортных судов несколько снизились по сравнению с началом 90-х.

Что касается рыболовных судов, то они редко попадают на страницы [10]. Была проанализирована

открытая информация о новых добывающих судах с сайтов основных проектантов таких судов. В табл.3 представлена собранная информация о типах рулей новых судов российского промыслового флота. Информация приведена по открытым данным, приведенным на сайтах фирм-проектантов, заводо-строителей, в регистрационной книге РМРС. Тип руля определен визуально с фотографий строящихся судов и изображений на сайтах.

Вывод, который можно сделать: стандартное решение для большинства рыболовных судов самых разных размеров сегодня – один балансирный руль с опорой на подошву ахтерштевня, установленный в ДП за ВРШ в неподвижной направляющей насадке. При этом в большинстве иностранных проектов рули снабжают закрылком, переключателем которого осуществляется вместе с пером от основного привода (рули Беккера). Определенное распространение по-прежнему имеют поворотные насадки. Появляются проекты промысловых судов с полноповоротными ВРК. На современных судах японской постройки можно встретить рули с профилем типа «рыбий хвост» и развитыми торцевыми шайбами (рули Шиллинга).

Таблица 3

Типы рулей добывающих судов промыслового флота, которые строятся в России или для российских судовладельцев

№ п/п	Проект	Тип судна	Длина $L_{нб}$, м	Водоизм-е полное, т	Тип руля/средства активного управления
1	SK 3101R	траулер-сейнер	50,6	2298	балансирный с ниж. опорой и закрылком
2	174610	траулер	27	450	балансирный с нижней опорой
3	03141	краболов	63,27	1586	балансирный с нижней опорой
4	ССа5712LS	краболов	57,7	?	балансирный с ниж. опорой и закрылком
5	ST-184AS	краболов	61,9	3924	балансирный с ниж. опорой и закрылком
6	T30B	траулер	36,2	585	поворотная насадка со стабилизатором
7	T40B	траулер	44,15	?	балансирный с нижней опорой
8	170701	траулер	81,6	5500	балансирный с ниж. опорой и закрылком
9	MT1112XL	ярусолов	59	2200	две полноповоротные ВРК
10	ST-192	супертраулер	108,2	13528	балансирный с ниж. опорой и закрылком
11	KMT-01	траулер	86	7468	балансирный с ниж. опорой и закрылком
12	KMT-02	траулер	80,4	?	балансирный с ниж. опорой и закрылком
13	04130	траулер	26,45	306	поворотная насадка
14	GM 3.02	траулер	35,6	580	балансирный с нижней опорой
15	03070	краболов	50,45	1931	балансирный с ниж. опорой и закрылком
16	03095	траулер	70	3730	балансирный с ниж. опорой и закрылком

Площадь пера руля

Выбор геометрических характеристик руля (рулей) начинается с оценки необходимой площади руля A – одного из наиболее важных параметров, напрямую влияющих на эффективность рулевого устройства. Для рулей, установленных за обтекаемым рудерпостом или опирающихся на обтекаемый кронштейн на ранних стадиях проектирования для простоты в площадь A обычно включается и площадь рудерпоста (кронштейна) в пределах высоты пера руля.

Существуют методики, которые позволяют с некоторой степенью достоверности определить требуемую площадь руля под заданные характеристики управляемости, зная главные размерения судна, его скорость, параметры его формы корпуса (в первую очередь, площадь диаметрального батокса, форму дейдвуда), абсциссу центра его тяжести и т.д., см., например, [20, 21]. На ранних стадиях проектирования, когда подобной информации нет, или она может неоднократно поменяться в процессе разработки проекта, в практике используются значительно более простые зависимости, связывающие площадь A с произведением расчётной длины судна L на осадку по летнюю грузовую ватерлинию d :

$$A = \frac{Ld}{\mu} = \chi Ld \quad (1)$$

где μ и χ – некоторые числовые коэффициенты, которые могут быть определены с судна-прототипа или взяты из значений, приведённых в литературе (для типовых судов).

В различных исследовательских работах, при обработке статистики по реальным судам и морским авариям, при разработке нормативных документов (Правил и Норм классификационных обществ)

неоднократно производились попытки разработки формул типа (1), где коэффициенты μ или χ представлялись бы в виде функции от размерений судна, его скорости или других параметров. Некоторые из них можно признать весьма удачными, и они широко применяются на практике.

В Правилах Регистра СССР до конца 60-х гг. содержалась формула:

$$A = pq \frac{Ld}{100} \left(0,75 + \frac{150}{L + 75} \right), \quad (2)$$

где $p=1$ для рулей, работающих непосредственно за гребным винтом, $p=1,2$ для рулей, не работающих непосредственно за винтом; $q=1,25$ для буксирных судов и $q=1,0$ для остальных.

Использование формулы (2) обычно приводит к занижению требуемой площади руля по сравнению с имеющейся практикой (именно поэтому она и была убрана из текста Правил).

При разработке Правил DNV в 1972 г. была предложена формула

$$A = \frac{Ld}{100} \left(1 + 25 \left(\frac{B}{L} \right)^2 \right), \quad (3)$$

которая в более поздних редакциях была откорректирована с целью учёта влияния не только расчётной ширины B , м, но и коэффициента общей полноты судна C_B :

$$A = \frac{Ld}{100} \left(1 + 50 C_B \left(\frac{B}{L} \right)^2 \right). \quad (4)$$

В иностранной практике эта формула широко используется [6, 8, 9]. Отметим, что в случае, когда руль установлен не за гребным винтом, значения, определённые по формулам (3) или (4) следует увеличить, по крайней мере на 30%.

Японское агентство по расследованию аварий на море (Japan Marine Accident Inquiry Agency) предложило формулу [22]:

$$A = \frac{Ld}{100} \left(\frac{BC_B}{L} \cdot \frac{54}{7,2 - t_n \cdot v_s / L} + K \right) \quad (5)$$

где v_s – скорость судна, уз; t_n – время перекладки руля из положения 35° одного борта до 30° противоположного борта, с,

$$K = 0,0008 \left(\frac{L}{BC_B} \right)^2 \frac{B}{d} \geq 0,16.$$

Время перекладки руля в формуле (5) рекомендуется определять по формуле

$$t_n = 3,2 \frac{L}{v_s} + 5. \quad (6)$$

Отметим, что по формуле (6) время перекладки может получаться значительно выше нормативных

28 с [23], причём для судов длиной, по крайней мере, свыше 100 м результат превышает реализуемые современными рулевыми приводами на практике значения. Однако расчёты показывают, что именно при значениях, полученных по (6), формула (5) даёт требуемые площади руля, близкие к фактически наблюдаемым. По этой причине, вероятно, t_n можно воспринимать как условный параметр.

В данной работе были собраны данные по площади рулей 110 морских судов, построенным в последние 30 лет (источник – чертежи, имеющиеся в распоряжении и [10]). Это 40 танкеров, 16 контейнеровозов и универсальных сухогрузов, 11 газовозов, 19 навалочников, 24 рыболовных судна. В этом разделе статьи и ниже информация представлена на основании анализа этих данных.

В табл. 4 показаны полученные значения коэффициентов из формулы (1) и сопоставлены с некоторыми рекомендациями.

Таблица 4

Полученные значения коэффициентов в (1)

№ п/п	Тип судна	Рекомендации	Получено в данной работе (в скобках – среднее по выборке)	
			μ	χ
1	Одновинтовые танкеры, балкеры	$\mu = 53 \dots 77$ [2]	35...93 (54)	0,011...0,028 (0,019)
2	Контейнеровозы	$\chi = 0,012 \dots 0,017$ [24]	35...63 (51)	0,016...0,028 (0,020)
2	Рыболовные суда	$\chi = 0,030 - 0,040$ [8] $\chi = 0,025 - 0,065$ [25]	29...45 (37)	0,022...0,034 (0,027)*
3	Двухвальные газовозы с 2 рулями**	$\chi = 0,016 \dots 0,022$ [8] $\chi = 0,020 \dots 0,028$ [25]	34...50 (43)	0,020...0,029 (0,023)

Примечание: * - в выборке присутствуют суда как с закрылками, так и без

** - учтена суммарная площадь двух рулей

Ниже представлены графики зависимости фактической площади пера руля A от произведения Ld для рассматриваемых судов (рис.6-9). Для каждого рассмотренного судна показаны также значения, полученные по формулам (2), (4) и (5).

Танкеры и навалочники в силу близких форм корпуса и скоростей хода объединены на графике. Пунктирной линией показана линейная аппроксимация по фактическим значениям.

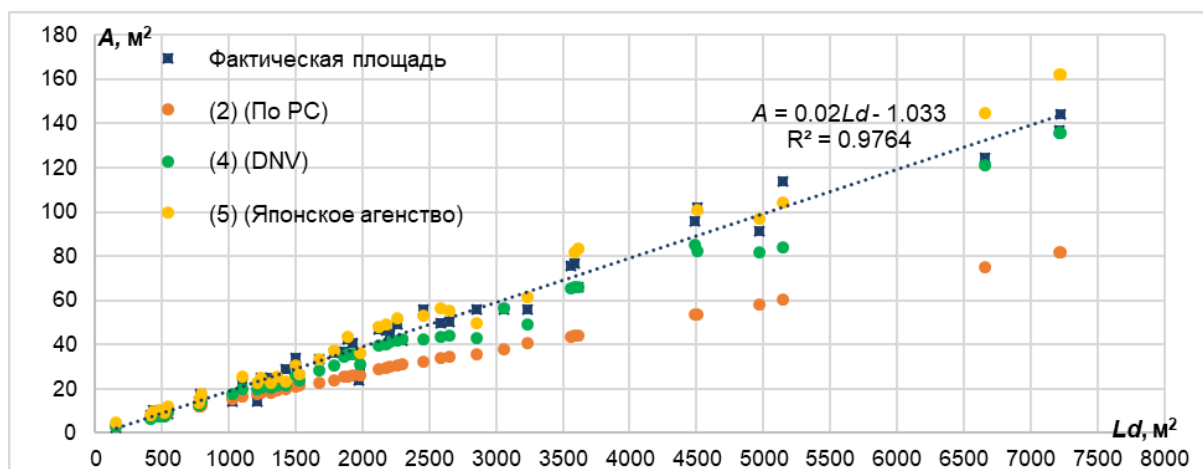


Рис. 6. Зависимость площади пера руля от произведения Ld для наливных судов и навалочников

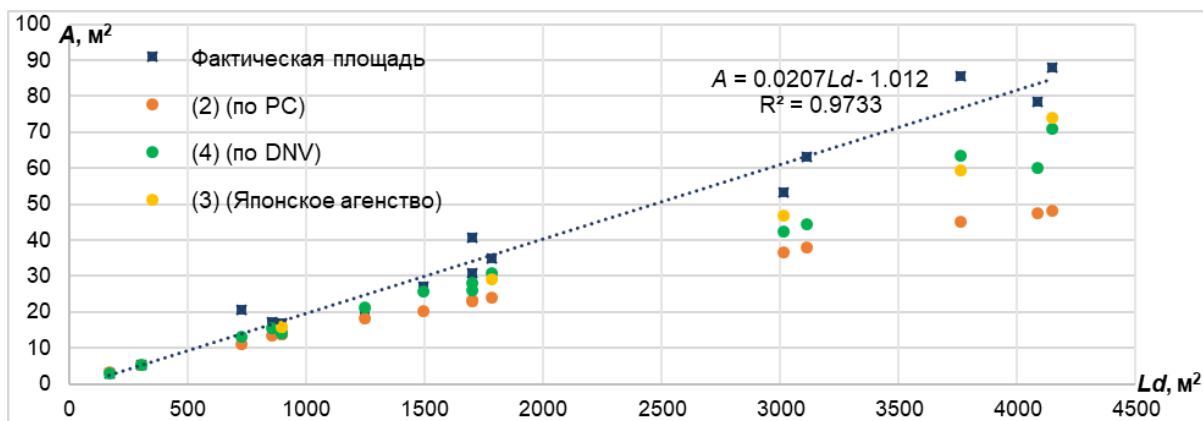


Рис. 7. Зависимость площади палубы от произведения Ld для сухогрузов и контейнеровозов

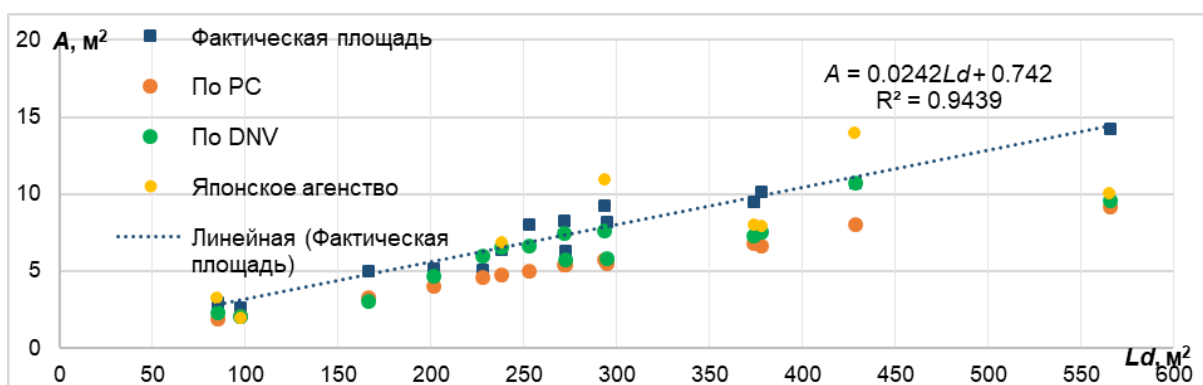


Рис. 8. Зависимость площади палубы от произведения Ld для рыболовных судов

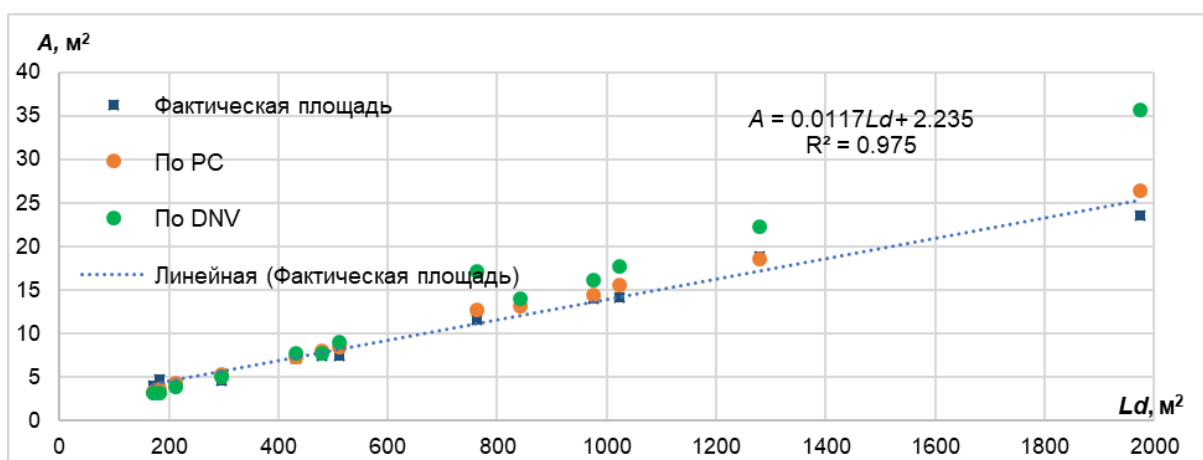


Рис. 9. Зависимость площади палубы от произведения Ld для палуб с закрылками

Можно сделать вывод о том, что (4) и (5) дают приемлемые для первоначального выбора площади палубы без закрылка значения для полнообводных транспортных судов – танкеров и балкеров. При этом в большинстве случаев (4) даёт значение несколько меньше фактического, а (5) – несколько больше. Хорошую точность имеют оценки по (4) для рыболовных судов.

Для контейнеровозов и универсальных сухогрузных судов полученные данные показывают более существенную погрешность при использовании (4) и (5), что, впрочем, отчасти может объясняться и недостаточным объёмом выборки.

Обе формулы показали тенденцию к занижению площади.

Формула (2), несмотря на то, что она давно потеряла актуальность для обычных палуб, позволяет выполнить первоначальную оценку площади палубы, оснащенных закрылком: требуемая площадь таких палуб существенно снижается, что особенно заметно для палуб площадью более 10 м² (рис.9).

В целом можно сделать вывод о том, что рекомендации из классических справочников и пособий, а также современных иностранных публикаций достаточно хорошо соотносятся с практикой, а выводы об использовании формул (2)-

(5) близки к сформулированным по данным 70-х гг. в [22].

Высота, относительное удлинение, коэффициент компенсации руля и его расположение относительно гребного винта

В силу того, что проектанту во многих случаях выгодно значение относительного удлинения λ , близкое к наибольшему конструктивно возможному, высота руля h_p определяется высотой кормового подзора h' , расстоянием от ОП до нижней кромки руля h_n и зазором между корпусом и верхней кромкой руля на оси вращения (рис.10). В то же время, существуют рекомендации по выбору расстояния от ватерлинии (летней грузовой или наименьшей эксплуатационной) до верхней кромки руля. Так, в [1] рекомендуется заглубление верхней кромки пера руля для судна в грузу не менее $0,25h_p$.

Обратимся к данным по высоте кормового подзора. Высоту его представим в долях от расчётной высоты борта по верхнюю палубу D и от осадки по ЛГВЛ d . Анализ имеющихся данных показал следующие характерные значения:

- добывающие промысловые суда: $h'/d=0,77$ (стандартное отклонение 0,134), $h'/D=0,56$ (стандартное отклонение 0,15);
- наливные и навалочники: $h'/d=0,77$ (стандартное отклонение 0,056), $h'/D=0,56$ (стандартное отклонение 0,06);
- универсальные сухогрузы и контейнеровозы: $h'/d=0,83$ (стандартное отклонение 0,095), $h'/D=0,55$ (стандартное отклонение 0,06).

В [5] сказано, что корейские инженерные центры используют стандартную величину зазора между ОП и нижней кромкой пера руля равную 400 мм.

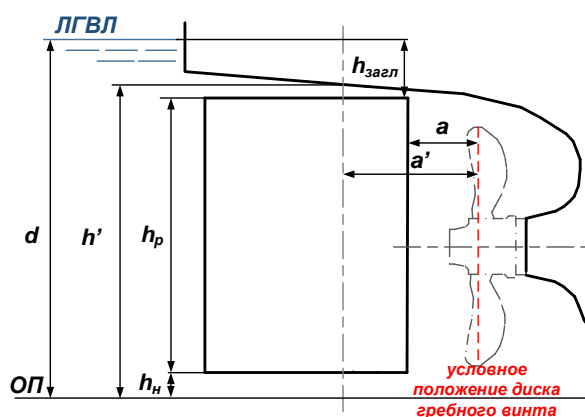


Рис. 10. Параметры, определяющие положение руля в кормовом подзоре

При указанных выше соотношениях высоты кормового подзора и высоты борта относительное удлинение λ перьев рулей, а также комплекса руль-кронштейн в случае полуподвешенного руля по результатам исследования составили:

- промысловые $\lambda=1,67$ (стандартное отклонение 0,19);
- наливные и навалочники $\lambda=1,63$ (стандартное отклонение 0,16);
- сухогрузы и контейнеровозы $\lambda=1,66$ (стандартное отклонение 0,16).

Говоря о коэффициенте компенсации, следует выделить следующие группы рулей: с нижней

опорой, с нижней опорой и закрылком, полуподвешенные, подвешенные и подвешенные с закрылком. Средние значения, полученные в данном исследовании показаны в табл.5. Отметим, что в большинстве случаев относительная ширина балансирующей части полуподвешенных рулей не превышает 0,35 ширины пера руля, что хорошо соотносится с рекомендациями, указанными во многих справочниках и пособиях. Наличие закрылка существенно смещает центр давления в сторону кормовой части профиля, что отражается на увеличении коэффициента компенсации.

Таблица 5

Полученные значения коэффициента компенсации

Тип руля	K	Станд. отклонение
С ниж. опорой	0,30	0,08
С ниж. опорой с закрылком	0,39	0,05
Полуподвешенной	0,25	0,02
Подвешенной	0,35	0,05
Подвешенной с закрылком	0,42	0,03

Примечание: при определении коэффициент компенсации площадь закрылка включалась в общую площадь руля

В редакции Правил до 2019г. содержались требования по величине зазора между гребным винтом и пером балансирующего руля. Так расстояние между носовой кромкой балансирующего пера руля и гребным винтом должно быть не менее 0,1 диаметра винта D_e . В отечественной литературе можно найти некоторые рекомендации. Например, согласно [1] для одновинтовых судов длиной L с одним рулём (см. рис.10):

- для балансируемых с опорой на подошву ахтерштевня $a=0,0017L \geq 0,1D_e$;
- для полуподвешенных $a'/D_e=(0,55...0,65)$;
- для подвешенных $a'/D_e=(0,6...1,0)$

В данном исследовании получено:

- балансируемые с опорой на подошву ахтерштевня $a/D_e=0,26$ (стандартное отклонение 0,07)
- полуподвешенные $a'/D_e=0,58$ (стандартное отклонение 0,10)
- подвешенные $a'/D_e=0,56$ (стандартное отклонение 0,14).

Размеры кронштейна полуподвешенного руля

Результаты, приведенные выше, показывают, что полуподвешенные рули по-прежнему распространены на морских тихоходных судах. Площадь кронштейна $A_{крон}$ засчитывается в требуемую площадь комплекса руль-кронштейн A_k , поэтому интерес представляет соотношение $A_{крон}/A_k$. Размеры петли кронштейна определяются, в первую очередь, исходя из требуемых размеров устанавливаемого штыря, а также некоторых технологических факторов, однако, так как на данном этапе проектирования рулевого устройства значения реакции опоры штыря неизвестно, оценка диаметра штыря невозможна. В связи с этим предлагается определение размеров кронштейна, а также петли в первом приближении, исходя из полученных статистических зависимостей в долях от высоты пера руля (рис.11).

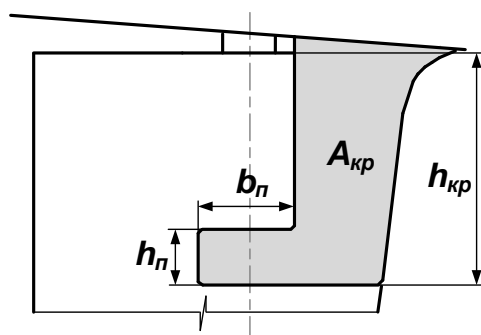


Рис. 11. Параметры, определяющие форму кронштейна в плане

Анализ полученных результатов показал, что соотношение высоты петли кронштейна к высоте пера руля h_k/h_p для кронштейнов с одной петлей составляет $h_k/h_p=0,48$ (стандартное отклонение 0,03) и является независимой величиной. Это соотношение объясняется в первую очередь, вопросами прочности устройства [27]. Помимо высоты и площади кронштейна можно выделить такой параметр как угол наклона носовой кромки. Результат анализа современных проектных решений показал, что данный параметр лежит в довольно узком диапазоне и выбирается проектантом для каждого конкретного случая, сходя из опыта проектирования, особенностей расположения винторулевого, гидродинамических расчетов и пр. Полученная зависимость площади кронштейна от площади всего комплекса руль-кронштейн показана на рис. 12. Для первоначальных оценок можно считать, что $A_{крон}/A_k = (0,13...0,17)$ при $A_k \leq 60 \text{ м}^2$ и $(0,15...0,18)$ при большей площади или пользоваться аппроксимирующей зависимостью, представленной на рисунке.

При исследовании размеров петли кронштейна в первую очередь представляет интерес её ширина, т.к. высота петли кронштейна определяется высотой втулки штыря, которая в свою очередь нормируется в долях от диаметра штыря. Так, анализ результатов показал следующие зависимости $b_n/h_p=0,14$ (Стандартное отклонение 0,02), $h_n/b_n=0,58$ (Стандартное отклонение 0,06) (см.рис. 13).

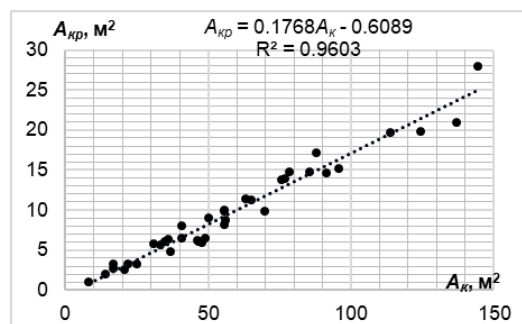


Рис. 12. Зависимость площади кронштейна от площади комплекса руль-кронштейн

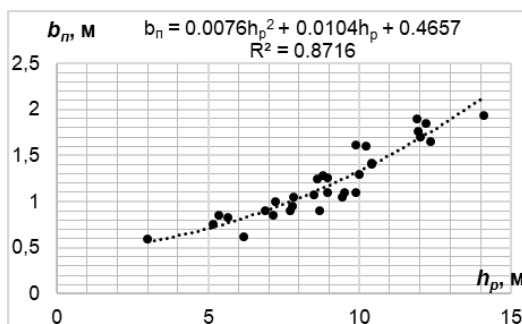


Рис. 13. Зависимость ширины петли кронштейна от высоты пера руля

Заключение

Несмотря на развитие активных средств управления судами, традиционные рулевые устройства совершенствуются. Этому способствуют развитие вычислительной гидромеханики, а также стремление к повышению эффективности морских судов. Одной из тенденций в развитии Правил классификационных обществ последних десятилетий стал отказ от строгого нормирования параметров компоновки винторулевого комплекса [27]. Представленное выше исследование, опирающееся на эмпирические данные, авторы проделали не в целях противодействия этому, а в попытке ответить на вопрос о том, что представляет собой рулевое устройство морского судна сегодня. Полученные результаты используются в курсовом и дипломном проектировании, могут быть использованы при разработке предложения по корректировке требований Части III Правил РС, при разработке программных средств автоматизации проектирования морских судов.

Литература

1. Шмаков М.Г. Рулевые устройства судов (проектирование и расчёт). Л.: Судостроение, 1968. – 360 с.
2. Справочник по судовым устройствам/ А.Н. Гурович [и др.]. В 2-х т. Т. 1. Л.: Судостроение, 1975. – 352 с.
3. Справочник по теории корабля. Судовые движители и управляемость/ Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А. и др. Л.: Судостроение, 1973. – 512 с.
4. Гофман А.Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник. Л.: Судостроение, 1988. – 360 с.
5. Kim H.-J., Kim S.-H., Oh J.-K., Seo D.W. A Proposal on Standard Rudder Device Design Procedure by Investigation of Rudder Design Process at Major Korean Shipyards, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 20, No. 4, 2012. – pp. 450-458
6. Martinez-Lopez A., Munin-Doce A. A new method for a preliminary definition of a high-performance rudder for tuna purse seiners. Polish Maritime Research, 3(75), Vol.19, 2012. pp. 26-35.
7. Brix J. et al. Manoeuvring Technical Manual Hamburg: Seehafen Verlag, 1993.
8. Molland A., Turnock S. Marine rudders and control surfaces. Principles, data, design and applications. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2007. – 420 p.

9. Liu J., Hekkenberg R. Sixty years of research on ship rudders: effects of design choices on rudder performance. *Ships and Offshore Structures*, Vol.12, No.4, 2017, pp.495-512
10. Significant Ships of 1991-2020. Royal Institute of Naval Architects
11. Lücke T., Streckwall H. Cavitation Research on a Very Large Semi Spade Rudder. First International Symposium on Marine Propulsors smp'09, Trondheim, Norway, June 2009. 9p.
12. Oh J.-K., Lee C.-M., Lee H.-B., Rhee S.-H., Suh J.-C., Kim H.-C. Rudder Gap Cavitation Suppression Using Gap Flow Blocking Devices. *Journal of Ship&Ocean Technology*, 2008, Vol.12, No.4, pp.20-31
13. Shen Y.T., Jiang, C.W., Remmers, K.D. A twisted rudder for reduced cavitation. *Journal of Ship Research*, Vol. 41, No. 4, December 1997, pp. 260-272
14. Kim I.-H., Kim M.-C., Lee J.-H., Chun J.-H., Jung U.-H. Study on Design of a Twisted Full-Spade Rudder for a Large Container Ship by the Genetic Algorithm *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 2009, Vol.46, No.5, pp.479-487 (in Korean)
15. Ahn K., Choi G.-H., Son D.-I., Rhee K.-P. Hydrodynamic characteristics of X-Twisted rudder for large container carriers. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2012, Vol.4, 3, pp.322-334.
16. Kim J.-H., Choi J.-E., Choi B.-J., Chung S.-H. Twisted rudder for reducing fuel-oil consumption. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2014, Vol.6, 3, pp.715-722
17. Park I., Paik B., Ahn J., Kim J. The Prediction of the Performance of a Twisted Rudder. *Applied Sciences*, 2021, Vol.11, no. 15: 7098. <https://doi.org/10.3390/app11157098>
18. King Support Rudder KSR - Becker Marine Systems. Интернет-ресурс. URL: <https://www.becker-marine-systems.com/products/manoeuvring-systems/king-support-rudder-ksr.html>
19. High efficiency rudder is simple to install. *Riviera Newsletters*. Интернет-ресурс. URL: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/high-efficiency-rudder-is-simple-to-install-50637> (проверено 20.10.2022)
20. Асиновский В.И. Приближённый способ определения геометрических характеристик руля, обеспечивающего заданную поворотливость. – Труды ЛИВТ, вып. 133. Л.:ЛИВТ, 1972, с.31-38
21. Ключенко А.Ю., Кузнецов В.Ю. Численный метод определения площади пера руля и погруженной площади диаметральной плоскости корабля при исследовательском проектировании. Труды Крыловского государственного научного центра, 2019. №2S2. С.83-90
22. Пентюхов Ю.П. Особенности определения площади пера руля морских транспортных судов / Судовые устройства. Сборник научных трудов ЛКИ. Л.:ЛКИ, 1982, с.72-80
23. Правила классификации и постройки морских судов. Часть III «Устройства, оборудование и снабжение». Российский морской регистр судоходства, 2022. Интернет-ресурс. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules>
24. Barrass B. *Ship design and performance for masters and mates*. 1st ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004
25. Александров М.Н. Рулевое устройство. Ч.1.Л.: ЛКИ, 1970. 64 с.
26. Громов Р.С., Иванов К.А. О рациональном размещении площади полубалансирного руля относительно его опор на кронштейне или дейдвуде. Вопросы судостроения. Серия «Стандартизация и метрология», ЦНИИ «Румб». Л.: 1980, с.30-35
27. Егоров Г.В., Кутейников М.А., Егоров А.Г. О нормировании величины зазора между гребным винтом и корпусом судна. *Морской вестник*, 2018, №2(66). С.7-10.

References

1. Shmakov M.G. *Rulevye ustrojstva sudov (proektirovanie i raschyot) [Steering Arrangements of Ships (Engineering and Design)]*. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1968. – 360 p. (in Russian)
2. A.N. Gurovich, V.I. Asinovskij, B.N. Lozgayov, D.A. Grinberg *Spravochnik po sudovym ustrojstvam. Tom 1 [Handbook of Ship Gears, Equipment and Outfitting. Part One]*. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1975, 352 p. (in Russian)
3. Vojtkunskij Ya.I., Pershic R.Ya., Titov I.A et al. *Spravochnik po teorii korablya. Sudovye dvizhiteli i upravlyaemost' [Ship Theory Handbook. Ship Propulsion and Maneuverability]*. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1973, 512 p. (in Russian)
4. Gofman A.D. *Dvizhitel'no-rulevoy kompleks i manevrirovanie sudna. Spravochnik [Propulsion complex and maneuvering of a ship]* Leningrad, Sudostroenie Publ., 1988. – 360 p. (in Russian)
5. Hyun-Jun Kim, Sang-Hyun Kim, Jung-Keun Oh, Dae-Won Seo A Proposal on Standard Rudder Device Design Procedure by Investigation of Rudder Design Process at Major Korean Shipyards, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 20, No. 4, 2012. – pp. 450-458
6. Martinez-Lopez A., Munin-Doce A. A new method for a preliminary definition of a high-performance rudder for tuna purse seiners. *Polish Maritime Research*, 3(75), Vol.19, 2012. – pp.26-35.
7. Brix J. et al. *Manoeuvring Technical Manual Hamburg*: Seehafen Verlag, 1993.
8. Molland A., Turnock S. *Marine rudders and control surfaces. Principles, data, design and applications*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2007. – 420 p.
9. Liu J., Hekkenberg R. Sixty years of research on ship rudders: effects of design choices on rudder performance. *Ships and Offshore Structures*, Vol.12, No.4, 2017, pp.495-512
10. Significant Ships of 1991-2020. Royal Institute of Naval Architects
11. Lücke T., Streckwall H. Cavitation Research on a Very Large Semi Spade Rudder. First International Symposium on Marine Propulsors smp'09, Trondheim, Norway, June 2009. 9p.
12. Oh J.-K., Lee C.-M., Lee H.-B., Rhee S.-H., Suh J.-C., Kim H.-C. Rudder Gap Cavitation Suppression Using Gap Flow Blocking Devices. *Journal of Ship&Ocean Technology*, 2008, Vol.12, No.4, pp.20-31

13. Shen, Y.T., Jiang, C.W., Remmers, K.D. A twisted rudder for reduced cavitation. Journal of Ship Research, Vol. 41, No. 4, December 1997, pp. 260-272
14. Kim I.-H., Kim M.-C., Lee J.-H., Chun J.-H., Jung U.-H. Study on Design of a Twisted Full-Spade Rudder for a Large Container Ship by the Genetic Algorithm Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 2009, Vol.46, No.5, pp.479-487 (in Korean)
15. Ahn K., Choi G.-H., Son D.-I., Rhee K.-P. Hydrodynamic characteristics of X-Twisted rudder for large container carriers. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2012, Vol.4, 3, pp.322-334.
16. Kim J.-H., Choi J.-E., Choi B.-J., Chung S.-H. Twisted rudder for reducing fuel-oil consumption. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2014, Vol.6, 3, pp.715-722
17. Park I., Paik B., Ahn J., Kim J. The Prediction of the Performance of a Twisted Rudder. Applied Sciences, 2021, Vol.11, no. 15: 7098. <https://doi.org/10.3390/app11157098>
18. King Support Rudder KSR - Becker Marine Systems. URL: <https://www.becker-marine-systems.com/products/manoeuvring-systems/king-support-rudder-ksr.html>
19. High efficiency rudder is simple to install. Riviera Newsletters. URL: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/high-efficiency-rudder-is-simple-to-install-50637>
20. Asinovskiy V.I. Priblizhennyi sposob opredeleniya geometricheskikh kharakteristik rulya, obespechivayushchego zadannuyu povorotlivost'. – Transactions of LIWT, Issue No.133, Leningrad, 1972, pp.31-38 (in Russian)
21. Klyuchenko A.Yu., Kuznetsov V.Yu. Chislennyi metod opredeleniya ploshchadi pera rulya i pogruzhennoy ploshchadi diametral'noy ploskosti korablya pri issledovatel'skom proektirovanii. [Numerical calculation method for rudder fin area and submerged area of ship center-plane at research design stage]. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; Special Edition 2: 83–90 (in Russian)
22. Pentyukhov Yu.P. Osobennosti opredeleniya ploshchadi pera rulya morskikh transportnykh sudov [Some issues of rudder blade area estimation as applicable to marine transport vessels]. Sudovye ustroystva [Ship gears, Equipment and Outfitting]. Transactions of Leningrad Shipbuilding Institute. Leningrad, LKI Publ., 1982, pp.72-80 (in Russian)
23. Rules for the Classification and Construction of Sea-going Ships. Pt.III «Equipment, Arrangements and Outfit». Russian Maritime Register of Shipping, 2022. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules>
24. Barrass B. Ship design and performance for masters and mates. 1st ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004
25. Aleksandrov M.N. Rulevoe ustroystvo. Ch.1 [Ship rudder system. Part 1]. Leningrad, LKI Publ., 1970, 64p. (in Russian)
26. Gromov R.S., Ivanov K.A. O ratsional'nom razmeshchenii ploshchadi polubalansirnogo rulya otnositel'no ego opor na kronshteyne ili deydvude. [On the rational arrangement of a semi-spade ship rudder relative to its supports on a rudder horn or deadwood]. Voprosy sudostroeniya. Seriya «Standartizatsiya i metrologiya», TsNII «Rumb». Leningrad, 1980, pp.30-35 (in Russian)
27. Egorov G.V., Kuteynikov M.A., Egorov A.G. O normirovanii velichiny zazora mezhdru grebnym vintom i korpusom sudna. [On the normalization of the gap between the propeller and the hull of the vessel]. Morskoy Vestnik, 2018, №2(66). pp.7-10. (in Russian)

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кирилл Вадимович Плотников, старший преподаватель кафедры конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: plotnikov@smtu.ru

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

Дмитрий Сергеевич Долгов, аспирант, ассистент кафедры конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: dolgov_dmitriy_spb@mail.ru

Dmitriy S. Dolgov, graduate student, assistant lecturer of the Department of ship structure and technical operation, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: dolgov_dmitriy_spb@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.11.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.12.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 25.12.2022.

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS

Научная статья

УДК 629.5.07

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.004>

Сравнение численных результатов метода расчета процесса продольного спуска судна на воду и метода посадки судна на мель

В.И. Осипов¹ vladik_moreak@mail.ru

¹Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Аннотация. Ежегодно происходит большое количество крушений различных по классификации гражданских судов. Как показывает статистика, ежегодно представляемая Организацией Объединенных Наций, количество прецедентов возрастает. К причинам крушений относят: значительные габариты судов, показатели которых также имеют тенденцию ежегодно увеличиваться, так за последние несколько лет было заложено рекордное количество сверхбольших грузовых судов; рост интенсивности движения на морских и речных путях; рост скоростей движения; неблагоприятные метеорологическими условия; недостатки современных навигационных систем и другими. В некоторых критических ситуациях судоводителем может быть принято решение намеренно посадить судно на мель для его спасения. В настоящее время исследование вопросов, связанных с намеренной посадкой судна на мель, становятся все актуальнее, в том числе из-за разработки новых методов стягивания судна с мели, исследований в области создания безэкипажных судов, разработки различных правовых и рекомендательных документов, касающихся данной проблемы. В представленной работе рассматривается процесс намеренной продольной посадки судна на мель носом, приводится метод вычисления посадки судна на мель носом способом последовательных приближений и его программная реализация. В качестве основополагающей теории рассматривается процесс продольного спуска судна на воду кормой, так как аналитически была выявлена схожесть их теоретических основ. Для сравнительного анализа, представленные алгоритмы были программно автоматизированы средствами встроенного языка математического пакета Maple. Таким образом в практике судовождения, используя наработки данной статьи в аварийной ситуации, можно рассчитать посадку на мель так, что это может привести к спасению судна и как следствие к спасению его экипажа и пассажиров.

Ключевые слова: численное моделирование, математическое моделирование, Maple, навигационная безопасность плавания, посадка судна на мель, спуск судна на воду, форс-мажорные обстоятельства, живучесть и непотопляемость судна, спасение судна, спасение пассажиров и экипажа, способ последовательных приближений.

Для цитирования: Осипов В.И. Сравнение численных результатов метода расчета процесса продольного спуска судна на воду и метода посадки судна на мель, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 51—58. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.004

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.004>

Comparison of the numerical results of the method for calculating the process of longitudinal descent of the ship on the water and the method of landing the vessel on the ground

Vladislav I. Osipov¹ a_gaikov@mail.ru

¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. A large number of wrecks, both large and small civil ships, occur annually in the world, and the number of precedents is only growing every year. The causes of wrecks can be very different, including wrecks can be caused by: significant dimensions of ships, which also tend to increase annually, so over the past few years a record number of extra-large cargo ships was laid; an increase in traffic intensity on sea routes; an increase in the speed of movement; unfavorable meteorological conditions; disadvantages of modern navigation systems and many others. As a result, there is a demand in the maritime industry for the development of various methods and means of rescuing a ship in case of its wreck. In critical situations, in order to save the vessel, the boatmaster may decide to deliberately run aground. At present, the study of issues related to the deliberate grounding of a ship is becoming more and more urgent, including due to the development of new methods of pulling a ship aground, developments in the field of creating unmanned vessels, and the emergence of relevant legal documents. In the presented work, the process of deliberate grounding of a ship aground forward with the bow is considered. A software implementation and an algorithm for the numerical (computer) calculation of a ship's grounding aground by the method of successive approximations are presented. As a fundamental theory, the process of longitudinal launching of a vessel into the water forward stern is considered, since analytically, the similarity of the main parameters describing the launching of a vessel into the water with the parameters describing the landing of a vessel aground was revealed. The paper presents the corresponding

algorithms and their software implementations. The presented programs are developed in the built-in language of the Maple mathematical package. Thus, in the practice of navigation, using the experience of this article in an emergency, it is possible to calculate aground so that it can lead to the salvation of the vessel and, as a consequence, of its crew and passengers.

Keywords: computer modelling, mathematical modeling, Maple, navigational safety of navigation, ship aground, launching a vessel, force majeure, survivability and unsinkability of the ship, salvage of the ship of passengers and crew, successive approximation method.

For citation: Vladislav I. Osipov, Comparison of the numerical results of the method for calculating the process of longitudinal descent of the ship on the water and the method of landing the vessel on the ground, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 51—58. DOI:10.37220/MIT.2023.59.1.004

Введение

В современных аспектах теории корабля (теории судна) [1], [2], большое внимание уделяется моделированию транспортных процессов. Под моделированием, в данном контексте, подразумевается математическое моделирование, т. е. формальное изложение приближенного математического представления и описания тех или иных процессов, в данном случае транспортных. В условиях развития цифровых технологий, процесс вычисления математической модели (иначе численной модели, компьютерной модели) может быть реализован на компьютере с помощью различных прикладных решений, таких как программный математический пакет Maple, или с помощью тех или иных языков программирования.

В качестве примера одного из таких транспортных процессов, можно выделить процесс посадки судна на мель [3]–[11]. В работе [11] было рассмотрено сравнение продольного спуска судна кормой на воду с посадкой судна на мель носом. Посадка на мель, в данной задаче, рассматривается как намеренное решение судоводителя в чрезвычайной ситуации с целью предотвращения гибели судна. В результате сравнения теоретических основ рассматриваемых методов была выявлена схожесть основных параметров, описывающих спуск судна на воду с параметрами, описывающими посадку судна на мель.

В данной работе, на основании результатов из работы [11] и известного метода расчета продольного спуска способом последовательных приближений, — хорошо исследованного и описанного, например в работе [1], предлагается подход к расчету намеренной посадки судна на мель и его численное моделирование в математическом пакете Maple. Исходя из этого, цель представленной работы заключается в рассмотрении метода расчета продольного спуска кормой способом последовательных приближений, и аналогичной реализации метода расчета намеренной посадки судна на мель. Изучение посадки судна на мель в таком направлении, может повысить эффективность применения данного метода в судоводительской практике. В аварийной ситуации, судоводитель может рассчитать посадку на мель так, что это приведет к спасению судна и как следствие к спасению, в первую очередь, его экипажа и пассажиров, а также ценного груза. Исходя из поставленной цели, в представленной работе возникает ряд задач:

- рассмотреть метод расчета продольного спуска способом последовательных приближений
- получить численные результаты метода расчета продольного спуска судна на воду кормой;

- разработать метод расчета намеренной посадки судна на мель носом;

- получить численные результаты метода расчета намеренной посадки судна на мель носом;

- сравнить численные результаты рассмотренных методов, проанализировать схожесть методов.

Современная редакция Международной конвенции о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты (ПДНВ) требует от судоводителя: умения осуществлять намеренную посадку на мель, понимания основных действий в случае, если посадка на мель неизбежна, и действий после посадки на мель [12]. Исходя из этого актуальность исследования вопросов, связанных с намеренной посадкой на мель, с каждым годом увеличивается. Помимо этого, об актуальности исследований, говорят новые разработки и подходы к процессу стягивания судна с мели, который заметно модернизировался за последнее время [13], [14]. Кроме того, в настоящее время ведется активная разработка безэкипажных судов [15]–[19]. Интеграция компьютерной модели намеренной посадки судна на мель на безэкипажные суда повысила бы их живучесть и безопасность эксплуатации.

Методы и материалы

Продольный спуск судна кормой можно рассматривать как обратный во времени процесс по отношению к посадке судна на мель носом. Исходя из этого, в качестве основополагающей теории рассмотрим задачу продольного спуска. При исследовании продольного спуска используют прямоугольную систему координат xuz , ось oz совмещается с перпендикуляром, проведенным из центра тяжести к линии спусковых дорожек. За неподвижную плоскость принимается порог стапеля.

В первом и втором периодах спуска положение судна в любой момент времени определяется одним параметром — расстоянием a_c от начала координат, измеренным по линии спусковых дорожек. Полагают $a_c > 0$, если начало координат не перешло за порог. Положение уровня воды относительно судна определяют отстоянием h_c от начала координат до уровня поверхности воды вдоль оси, проходящей через точку G (рис. 1).

Для исследования критической ватерлинии и ватерлинии всплытия при продольном спуске применяют способ последовательных приближений.

В качестве начального приближения, как правило, принимают ватерлинию, соответствующую барометрическому давлению

$$N_B^0 = \frac{D_c H_0 (\alpha_c + \psi_c)}{L - \tilde{x}_f + T_m (\alpha_c + \psi_c)}, \quad (1)$$

где D_c — водоизмещение, H_0 — продольная метацентрическая высота, α_c — угол наклона килея по отношению к горизонту (в примере на рис. 1 полагаем, что угол $\alpha_c \approx \beta_c$ [1], [11]), ψ_c — угол дифферента спущенного судна, L — длина задней части ползьев в плоскости xoz , T_m — осадка судна на миделе, $\tilde{x}_f = (x_f^0 + x_g)$, для которого x_f^0 — абсцисса центра тяжести площади ватерлинии, x_g — отстояние центра тяжести спускаемого судна от миделя. Может быть положено и другое начальное приближение, в том числе может использоваться произвольное значение. Очевидно, что чем ближе начальное приближение к искомому решению (с некоторой заданной погрешностью ε), тем меньше итераций необходимо выполнять в данном способе. Полагая начальное приближение в виде, заданном формулой (1), зачастую можно обойтись первым приближением.

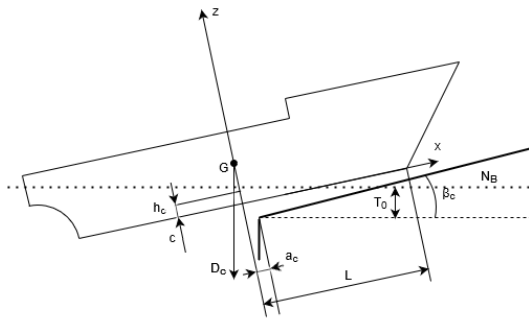


Рис. 1. Схема продольного спуска судна на воду

По грузовому размеру устанавливают параметр исходной ватерлинии

$$h_c^0 = T - \tilde{x}_f \alpha_c. \quad (2)$$

Полученная осадка h_c^0 откладывается на исправленном масштабе Бонжана и под углом α_c проводится исходная ватерлиния, для которой снимаются площади ω . Далее рассчитываются по известным формулам следующие параметры: площадь наклонной ватерлинии S , абсцисса \tilde{x}_c и некоторые другие параметры (подробнее см. [1], [2]).

Параметр ватерлинии всплытия задается в следующем виде

$$\Delta h_e = \frac{D_c L - \rho g W (L - \tilde{x}_c)}{\rho g S (L - \tilde{x}_f)}, \quad (3)$$

где ρ — плотность жидкости, g — ускорение свободного падения, W — объем, определяющий полную силу плавучести. Если величина, полученная из формулы (3), $\Delta h_e < 0,05 T_{cp}$ (T_{cp} — средняя осадка спущенного судна), можно ограничиться первым приближением. В качестве входной величины осадки

для следующей итерации принимают параметр h_e . Далее на основе параметра ватерлинии всплытия Δh_e рассчитываются различные величины, из которых отдельно стоит ответить величину a_e . Величина a_e характеризует положение судна на стапеле и вычисляется по формуле

$$a_e = \frac{1}{\beta_c} (T_0 - h_e - c). \quad (4)$$

Далее уточняется баксовое давление по формуле

$$N_B = D_c - \rho g W - \rho g S \Delta h_e. \quad (5)$$

Стоит отметить, что помимо параметров (4) и (5) рассчитываются и некоторые другие важные на практике параметры, которые в контексте данной работы опущены.

На основе значения величины h_e рассчитывается параметр критической ватерлинии

$$h_k = h_e + \frac{N_B}{\rho g S} - \sqrt{\frac{N_B}{\rho g S} (L - x_f) \beta_c}. \quad (6)$$

Для параметра h_k вычисляется значение величины a_k по формуле

$$a_k = \frac{1}{\beta_c} (T_0 - T_k - c) \quad (7)$$

и некоторые другие значения, которые также опускаются в данной работе, т.к. на прямую не влияют на дальнейшие расчеты.

Коэффициент опрокидывания вычисляется по формуле

$$k = \frac{-\rho g S (a_k + x_f) a_k \beta_c + N_B L - \rho g S \cdot x_f \Delta h_k}{D_c (\tilde{L} - L)}, \quad (8)$$

где \tilde{L} — полная длина ползьев в плоскости xoz (очевидно, что разность $\tilde{L} - L$ — это передняя часть ползьев в плоскости xoz). На основании значения коэффициента k , вычисляемого по формуле (8) можно делать выводы о возможности опрокидывания судна.

В работе [11] был рассмотрен продольный спуск судна на воду кормой и намеренная посадка судна на мель носом, проведено их аналитическое сравнение. В результате была установлена схожесть основных параметров, описывающих спуск судна на воду с параметрами, описывающими посадку судна на мель. Получено условие неопрокидывания судна при посадке его на мель, которое аналогично условию неопрокидывания судна в случае продольного спуска, то есть берет во внимание величину числителя из правой части выражения (8). Исходя из этого, аналогично расчету продольного спуска на воду способом последовательных приближений можно рассчитать посадку судна на мель для дальнейшего анализа возможности его опрокидывания.

Основная идея подхода к вычислениям подобным образом заключается в том, что в процессе продольной посадки судна на мель угол наклона килля по отношению к горизонту (дифферент) α_c и угол наклона морского дна относительно плоскости горизонта $\tilde{\beta}_c \approx \beta_c$ будут много малы. Исходя из этого дальнейшие математические рассуждения и выкладки приводят к тому, что задачу можно положить обратной во времени задаче спуска судна на воду и рассмотреть ее в статике.

В работе [11] была предложена формула

$$h_c^m = \tilde{T}_0 \left(1 + \frac{\alpha_c \tilde{\beta}_c}{2} \right) - \tilde{c}, \quad (9)$$

в которой \tilde{T}_0 — расстояние от ватерлинии до плоскости морского дна, \tilde{c} — расстояние от дна судна до плоскости морского дна. При осуществлении способа последовательных приближений i -е значение осадки $h_c^{m,i}$, полученное из формулы (9), аналогично, как в ранее рассмотренном методе, откладывается на исправленном масштабе Бонжана и под углом α_c проводится исходная ватерлиния, для которой снимаются площади ω .

Масштаб Бонжана представляет собой совокупность кривых, каждая из которых определяет погруженную площадь шпангоута в зависимости от его углубления и строится от следа соответствующего шпангоута на диаметральной плоскости судна. Чтобы использовать масштаб Бонжана, прежде всего, наносим на него полученную ватерлинию судна. После нанесения ватерлинии в точках ее пересечения со следами шпангоутов снимаем с кривых значения погруженных площадей шпангоутов и вычисляем водоизмещение и абсциссу центра величины.

С помощью масштаба Бонжана строим строевую по шпангоутам, которая используется в расчетах общей продольной прочности судна, также при разработке теоретического чертежа. Строевая по шпангоутам представляет собой кривую, ординаты которой в некотором выбранном масштабе равны погруженным по заданную ватерлинию площадям шпангоутов, отложенным вдоль следов шпангоутов на диаметральной плоскости судна. Таким образом, эта кривая характеризует закон распределения погруженных площадей шпангоутов по длине судна. Кривыми Власова называют кривые статических моментов половины площади шпангоута относительно осей oz и oy . Площадь шпангоута может быть найдена по следующей формуле

$$\omega = 2 \int_0^T y dz,$$

отсюда очевидно, что половина шпангоута задается формулой

$$\Omega = \frac{1}{2} \omega = \int_0^z y dz.$$

Статические моменты половины площади шпангоута относительно осей oz и oy соответственно:

$$\hat{c} = \frac{1}{2} \int_0^z y^2 dz, \quad \hat{b} = \int_0^z y z dz.$$

Аналогично предыдущему случаю рассчитываются по известным формулам параметры S и \tilde{x}_c . В случае посадки судна на мель параметр ватерлинии может быть рассчитан как абсолютное значение величины

$$\Delta \tilde{h}_e = \left| \frac{D_c L - \rho g W (L - \tilde{x}_c)}{\rho g S (L - \tilde{x}_f)} \right|.$$

Условием выхода из итерационного процесса является выражение

$$\left| \frac{\Delta \tilde{h}_e}{T_{ep}} \right| < \kappa, \quad \kappa = 0,05.$$

Результаты

Рассмотрим результаты работы двух программных реализаций, разработанных в ходе данной работы. Реализации осуществлялись на встроенном языке программирования в математическом пакете Maple.

Для демонстрации вычислений, рассмотрим пример из работы [1], в котором осуществляется анализ спуска способом последовательных приближений для некоторого ледокола. Заданы следующие характеристики судна: $\tilde{L} = 106,6$ м, $B = 23,1$ м, $H = 12,6$ м, $D = 35100$ кН, $x_g = -0,5$ м, $z_g = 7,35$ м, $\rho g = 10$ кН/м³. Помимо этого, заданы следующие характеристики спускового устройства: $\Delta D = 3350$ кН, $x_{\Delta D} = 14,3$ м, $L_H = 43,25$ м, $L_K = 30,75$ м, $b = 3,0$ м, $c = 1,0$ м, $\alpha_c = \beta_c = 0,0625$, $T_0^* = 2,2$ м. Перечисленные характеристики используются в качестве входных параметров при осуществлении вычислений.

Программная процедура вычисляет значение параметра h_e , после чего исходя из его величины рассчитываются остальные параметры. Далее производится расчет критического положения и соответствующих параметров, а также осуществляется анализ на возможность опрокидывания судна с помощью второй процедуры. Исходя из булева значения, получаемого в качестве выходного значения второй процедуры, можно сделать вывод — произойдет опрокидывание судна или нет. В случае, если функция обращается в 0 — опрокидывания не происходит, то есть в процессе вычислений параметр

$$M_N = -\rho g S (a_k + x_f) \alpha_k \beta_c + N_B (\tilde{L} - L) - \rho g S x_f \Delta h_k > 0, \quad (11)$$

если функция обращается в 1 — происходит опрокидывание, то есть

$$M_N < 0. \quad (12)$$

В рассматриваемом примере, при осуществлении вычислений, было получено значение параметра $M_N = 22763$ кН, следовательно опрокидывания не происходит.

Аналогичным образом на встроенном языке программного пакета Maple была разработана еще одна процедура, которая является основной при реализации способа последовательных приближений для расчета посадки судна на мель. Для примера демонстрации работы данной процедуры, были взяты такие же характеристики судна, как в предыдущем примере. Помимо этого, заданы следующие характеристики, описывающие дно, с которым осуществляется сцепка судна при посадке на мель: $\Delta D = 3350$ кН; $x_{\Delta D} = 14,3$ м; параметры \tilde{L}_H и \tilde{L}_K взяты близкими к L_H и L_K из предыдущего примера, так как в судоводительской практике, такого предположения может быть достаточно, таким образом $\tilde{L}_H \approx L_H = 43$ м, $L_K \approx L_K = 30$ м; $b = 3,0$ м; $\tilde{c} = 1,0$ м; $\alpha_c = \tilde{\beta}_c = 0,0625$; $T_0^* = 2,2$ м.

В результате вычислений имеем некоторое значение ватерлинии

$$\tilde{h}_b = h_c^m + \Delta \tilde{h}_b, \quad (12)$$

на основании которой строятся дальнейшие рассуждения: производится вычисление значения критического положения и соответствующих ему параметров. В итоге, аналогично из условий (11) и (12) полагаем, что опрокидывания судна не происходит, так как параметр $M_N \approx 22701$ кН.

Исходя из рассмотренных примеров, можно судить о практической схожести данных подходов.

Обсуждение

Развитие информационных технологий способствует созданию новых методов, подходов и средств, направленных на повышение эффективности организации тех или иных процессов в судоходной отрасли [20], [21]. В настоящее время предлагаются различные программные решения, которые могут быть направлены, как на навигационные аспекты судовождения [22]–[24], так и на образовательные отраслевые процессы [25], а также на повышение тех или иных аспектов безопасности на морском и речном транспорте [26]–[28]. Не исключением может стать и научный задел настоящей статьи.

Очевидно, что в процессе судовождения, ручные расчеты, осуществляемые судоводителем, в процессе намеренной посадки на мель — можно назвать неоптимальными с точки зрения затрат времени, особенно в контексте развития современных цифровых технологий. Таким образом, возникает необходимость создания программного обеспечения, которое могло бы автоматизировать подобного рода расчеты. Такое программное обеспечение может быть разработано таким образом, что входные параметры для расчета могут вводиться судоводителем не вручную, а будут поступать из других встроенных судовых систем. В результате чего, участие судоводителя будет необязательным при расчетах. Судоводителю будет необходимо только принятие решений исходя из автоматических расчетов. Также подобное программное обеспечение может быть интегрировано в бортовые системы безэкипажных судов.

Заключение

В ходе проделанной работы был рассмотрен метод расчета продольного спуска способом последовательных приближений. Данный способ был программно автоматизирован, для получения численных результатов процесса продольного спуска судна на воду кормой. Исходя из этого, аналогично расчету продольного спуска на воду способом последовательных приближений был предложен способ расчета намеренной посадки судна на мель носом и его компьютерное моделирование. В ходе проделанной работы были программно реализованы (программная реализация представленной математической теории была выполнена на встроенном языке математического пакета Maple) алгоритмы и математическая теория, которая в дальнейшем может быть использована в разработке прикладного программного обеспечения для судоводителей и точного компьютерного моделирования. Таким образом, на основе подобного рода комплексов программных подходов может быть решена задача из судоводительской практики. В процессе намеренной посадки судна на мель, в чрезвычайном случае, с помощью представленных результатов можно рассчитать посадку на мель так, что это может привести к спасению судна и, как следствие к спасению жизни экипажа и пассажиров, а также ценного груза, или груза, который при крушении судна может нанести вред экологии.

Литература

1. Войткунский Я. И. Справочник по теории корабля: в трех томах. Том 2. Статика судов. Качка судов / Я. И. Войткунский. Л.: Судостроение, 1985. 440 с.
2. Ершов А. А. Теория судна: Статика / А. А. Ершов, Б. П. Коротков, Г. Т. Милькин, М. С. Овсянников. СПб.: ГМА им. Макарова, 2009. 170 с.
3. Бураковский Е. П. К вопросу об оценке рисков посадки судна на мель / Е. П. Бураковский, П. Е. Бураковский, В. А. Дмитриевский // Известия КГТУ. 2013. № 29. С. 159–164.
4. Бураковский П. Е. Разработка конструктивной днищевой защиты для снижения последствий от посадок судов на мель / П. Е. Бураковский // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2014. № 2. С. 14–20.
5. Данилов Ю. А. Оценка маневренных качеств судна на основе информационно-логического анализа условий аварий посадок судов на мель / Ю. А. Данилов, Г. Н. Гаврильченко, М. В. Ясюк // В сборнике: БАЛТИЙСКИЙ МОРСКОЙ ФОРУМ. материалы VII Международного Балтийского морского форума: в 6 т. 2019. С. 29–34.

6. Ершов А. А. Безопасная посадка на мель как способ спасения судна при аварии / А. А. Ершов // Бюллетень транспортной информации. 2011. № 9 (195). С. 27–31.
7. Ершов А. А. Разработка системы интеллектуальной поддержки судоводителя для снижения опасности столкновений судов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Государственная морская академия имени Адмирала С.О. Макарова. Санкт-Петербург, 2012.
8. Ершов А. А. Рекомендации по намеренной посадке на мель, которые могли спасти т/х «Михаил Лермонтов» / А. А. Ершов // Эксплуатация морского транспорта. 2012. № 2 (68). С. 19–23.
9. Коршунов В. А. Исследование динамических характеристик при посадке судна на мель / В. А. Коршунов, Д. А. Пономарев, А. А. Родионов, К. М. Аунг Куи Мьинт // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. 2015. № 89-2 (373-2). С. 109–122.
10. Мануковский А. Ю. Определение площади воздействия на дно водоема при посадке и снятии плота с мели / А. Ю. Мануковский, Д. А. Макаров // Лесотехнический журнал. 2012. № 4 (8). С. 89–96.
11. Осипов В. И. Аналитическое сравнение продольного спуска судна на воду с посадкой на мель / В. И. Осипов // Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 1. № 3 (53). С. 41–46.
12. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (ПДМНВ-78) с поправками. СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2010. 806 с.
13. Азовцев А. И. Способ стягивания судна с грунта / А. И. Азовцев, В. А. Кулеш, С. А. Огай // Патент на изобретение RU 2574870 С1, 10.02.2016. Заявка № 2014141494/11 от 14.10.2014.
14. Азовцев А. И. Устройство для снятия судна с мели / А. И. Азовцев, В. А. Кулеш, С. А. Огай // Патент на полезную модель RU 152813 U1, 20.06.2015. Заявка № 2014141391/11 от 14.10.2014.
15. Алцыбеев Г. О. Применение нейросетевых технологий компьютерного зрения для определения объектов навигационной опасности / Г. О. Алцыбеев, Г. В. Федоров // Сборник трудов Международной научно-практической конференции к 80-летию со дня рождения профессора А. С. Бутова. 2019. С. 19–24.
16. Бурылин Я. В. Авторулевой безэкипажного судна / Я. В. Бурылин, А. Н. Попов // Эксплуатация морского транспорта. 2019. № 3 (92). С. 41–45.
17. Епихин А. И. Проблемы внедрения безэкипажных судов на основе статистических исследований аварийных ситуаций и потерь судов / А. И. Епихин, М. А. Модина // Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 1. № 3 (53). С. 77–82.
18. Каретников В. В. К вопросу разработки системы управления безопасностью судоходной компании эксплуатирующей безэкипажные суда / В. В. Каретников, А. Е. Пелевин, О. О. Данилов, Я. В. Косяк // Транспортное дело России. 2019. № 6. С. 117–119.
19. Смоленцев С. В. Значение контекста в задаче кооперативного маневрирования безэкипажных судов / С. В. Смоленцев, А. Е. Сазонов, А. Е. Пелевин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2020. Т. 12. № 2. С. 221–229.
20. Матвеев А. А. Программное обеспечение и этапы внедрения организационно-технических комплексов проектирования судов / А. А. Матвеев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2014. № 2 (24). С. 162–172.
21. Нырков А. П. Модели, алгоритмы и программное обеспечение минимизации рисков мультимодальных перевозок / А. П. Нырков, А. А. Нырков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2013. № 1 (20). С. 67–73.
22. Козик С. В. Математическая модель движения навигационных светил на небесной сфере / С. В. Козик, А. А. Денисова, Г. О. Алцыбеев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2020. Т. 12. № 1. С. 35–45
23. Алцыбеев Г. О. Навигационный астрономический помощник: программа для ЭВМ / Г. О. Алцыбеев, С. В. Козик, В. А. Сибилев, А. А. Денисова, М. А. Филиппов. Свидетельство № 2020614451. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27 марта 2020 г.
24. Алцыбеев Г. О. Astronomical almanac / Г. О. Алцыбеев. Свидетельство № 2020665745. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17 ноября 2020 г.
25. Соколов С. С. Обзор программных средств адаптивного обучения специалистов транспортной отрасли / С. С. Соколов, А. В. Митрофанова // В сборнике: ИНФОРМАЦИОННЫЕ УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ (ИУСТ-ОДЕССА-2018). Материалы VII Международной научно-практической конференции. 2018. С. 33–34.
26. Федоров Г. В. Программа для прогнозирования распространения коронавирусной инфекции на круизных лайнерах с высокой численностью пассажиров / Г. В. Федоров, А. Р. Шкадова, Г. О. Алцыбеев. Свидетельство № 2020661907. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25 августа 2020 г.
27. Бухарметов М. Р. Информационное обеспечение безопасности движения судов / М. Р. Бухарметов, А. П. Нырков // В сборнике: Региональная информатика и информационная безопасность. 2017. С. 327–329.
28. Демаков Я. А. Кибербезопасность операционных систем: основные угрозы и методы защиты / Я. А. Демаков, С. С. Соколов // В сборнике: Информационные управляющие системы и технологии. Материалы IX Международной научно-практической конференции. — 2020. — С. 142–145.

References

1. Voytkunskiy, Ya. I. Spravochnik po teorii korablya: v trekh tomakh. Tom 2. Statika sudov. Kachka sudov [Handbook of ship theory: in three volumes. Volume 2. Statics of courts. pitching of ships]. L.: Sudostroenie, 1985.
2. Ershov, A. A., V. P. Korotkov, G. T. Milkin, and M. S. Ovsyannikov. Teoriya sudna: Statika [Ship Theory: Statics]. Saint Petersburg, 2009.

3. Burakovskiy, E. P., P. E. Burakovskiy, and V. A. Dmitrovskiy. K voprosu ob otsenke riskov posadki sudna na mel [On the issue of assessing the risks of running a ship aground]. *Izvestiya KGTU* 29 (2013): 159–164.
4. Burakovskiy, P. E. Razrabotka konstruktivnoy dnishchevoy zashchity dlya snizheniya posledstviy ot posadok sudov na mel [Development of constructive bottom protection to reduce the consequences of ships stranding]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* 2 (2014): 14–20.
5. Danilov, Yu. A., G. N. Gavrilchenko, and M. V. Yasyuk. Otsenka manevrennykh kachestv sudna na osnove informatsionno-logicheskogo analiza usloviy avariy posadok sudov na mel [Evaluation of the ship's maneuvering qualities based on information-logical analysis of the conditions of accidents of grounding of ships]. *Materialy VII Mezhdunarodnogo Baltiyskogo morskogo foruma* (2019): 29–34.
6. Ershov, A. A. Bezopasnaya posadka na mel kak sposob spaseniya sudna pri avarii [Safe grounding as a way to save a ship in an accident]. *Byulleten transportnoy informatsii* 9 (195) (2011): 27–31.
7. Ershov, A. A. Razrabotka sistemy intellektualnoy podderzhki sudovoditelya dlya snizheniya opasnosti stolknoveniy sudov [Development of an intelligent support system for the navigator to reduce the risk of ship collisions]. *Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences*, 2012.
8. Ershov, A. A. Rekomendatsii po namerennoy posadke na mel, kotorye mogli spasti t/kh «Mikhail Lermontov» [Recommendations for intentional grounding that could save "Mikhail Lermontov" the ship]. *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2 (68) (2012): 19–23.
9. Korshunov, V. A., D. A. Ponomarev, A. A. Rodionov, and K. M. Aung Kui Mint. Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik pri posadke sudna na mel [Investigation of dynamic characteristics during ship grounding]. *Trudy TsNII im. akad. A. N. Krylova* 89-2 (373-2) (2015): 109–122.
10. Manukovskiy, A. Yu., and D. A. Makarov. Opredelenie ploshchadi vozdeystviya na dno vodoema pri posadke i snyatii plota s meli [Determination of the area of impact on the bottom of the reservoir during landing and refloating the raft]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* 4 (8) (2012): 89–96.
11. Osipov, V. I. Analiticheskoe sravnenie prodolnogo spuska sudna na vodu s posadkoj na mel [Analytical comparison of longitudinal launching of a vessel into the water with grounding]. *Marine Intellectual Technologies* 1-3 (53) (2021): 41–46.
12. Mezhdunarodnaya konvenciya o podgotovke i diplomirovanii moryakov i nesanii vahty 1978 goda (PDMNV-78) s popravkami [International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW) with Manila Amendments]. SPb.: ZAO «CNIIMF», 2010.
13. Azovtsev, A. I., V. A. Kulesh, and S. A. Ogay. Sposob styagivaniya sudna s grunta [Method for pulling the ship off the ground]. *Invention patent. RU 2574870 C1*, 10.02.2016. No. 2014141494/11. 14.10.2014.
14. Azovtsev, A. I., V. A. Kulesh, and S. A. Ogay. Ustroystvo dlya snyatiya sudna s meli [Ship refloating device]. *Invention patent. RU 152813 U1*, 20.06.2015. No. 2014141391/11. 14.10.2014.
15. Alcybeev, G. O., and G. V. Fedorov. Primenenie neyrosetevykh tekhnologiy kompyuternogo zreniya dlya opredeleniya ob"ektov navigatsionnoy opasnosti [The use of neural network technologies of computer vision to identify objects of navigational danger]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii k 80-letiyu so dnya rozhdeniya professora A. S. Butova* (2019): 19–24.
16. Burylin, Y. V., and A. N. Popov. Avtorulevoj bezekipazhnogo sudna [Autopilot for unmanned vessel]. *Jekspluatatsiya morskogo transporta* 3 (92) (2019): 41–45.
17. Epikhin, A. I., and M. A. Modina. Problemy vnedreniya bezekipazhnykh sudov na osnove statisticheskikh issledovaniy avarijnykh situatsiy i poter sudov [Problems of introducing unmanned vessels on the basis of statistical studies of emergencies and ship losses]. *Marine Intellectual Technologies* 1-3 (53) (2021): 77–82.
18. Karetnikov, V. V., A. E. Pelevin, O. O. Danilov, and Y. V. Kosyak. K voprosu razrabotki sistemy upravleniya bezopasnostyu sudohodnoj kompanii ekspluatiruyushchej bezekipazhnye suda [On the issue of developing a safety management system for a shipping company operating unmanned vessels]. *Transport Business of Russia* 6 (2019): 117–119.
19. Smolentsev, S. V., A. E. Sazonov, and A. E. Pelevin. Znachenie konteksta v zadache kooperativnogo manevrirovaniya bezekipazhnykh sudov [The context importance in the problem of cooperative maneuvering of unmanned ships]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12 (2) (2020): 221–229.
20. Matveev, A. A. Programmnoe obespechenie i etapy vnedreniya organizacionno-tekhnicheskikh kompleksov proektirovaniya sudov [Software and introduction stages of organizational-technical complexes of ships projection]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2 (24) (2014): 162–172.
21. Nyrkov, A. and A. Nyrkov. Modeli, algoritmy i programmnoe obespechenie minimizatsii riskov multimodalnykh perevozok [Models, algorithms and software for risks minimizing of multimodal transportations]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1 (20) (2013): 67–73.
22. Kozik, S. V., A. A. Denisova, and G. O. Alcybeev. Matematicheskaya model dvizheniya navigacionnykh svetil na nebesnoj sfere [Mathematical model of the navigational celestial bodies motion on the celestial sphere]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 35–45.
23. Alcybeev, G. O., S. V. Kozik, V. A. Sibilev, A. A. Denisova, and M. A. Filippov. Navigacionnyj astronomicheskij pomoshchnik [Navigational astronomical helper]: computer program. *Certificate No 2020614451*. 27 Mar. 2020.
24. Alcybeev, G. O. Astronomical almanac [Astronomical almanac]: computer program. *Certificate No 2020665745*. 17 Nov. 2020.

25. Sokolov, S. S., and A. V. Mitrofanova. Obzor programmnyh sredstv adaptivnogo obucheniya specialistov transportnoj otrasli [Overview of software tools for adaptive training of transport industry specialists]. INFORMACIONNYYE UPRAVLJAJUSHHIE SISTEMY I TEHNOLOGII (IUST-ODESSA-2018) (2018): 33–34.
26. Fedorov, G. V. Programma dlja prognozirovaniya rasprostraneniya koronavirusnoj infekcii na kruiznyh lajnerah s vysokoj chislennostju passazhirov [Program for predicting the spread of coronavirus infection on cruise ships with a large number of passengers]: computer program. Certificate No 2020661907. 25 Aug. 2020.
27. Buharmetov, M. R., and A. P. Nyrkov. Informacionnoe obespechenie bezopasnosti dvizhenija sudov [Program for vessel traffic safety]. Regionalnaja informatika i informacionnaja bezopasnost (2017): 327–329.
28. Demakov, Ya. A., and S. S. Sokolov. Kiberbezopasnost operacionnyh sistem: osnovnye ugrozy i metody zashhity [Cybersecurity of operating systems: main threats and methods of protection]. Informacionnye upravljajushhie sistemy i tehnologii. Materialy IX Mezhdnarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (2020): 142–145.

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

Владислав Игоревич Осипов, аспирант, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: vladik_moreak@mail.ru

Vladislav I. Osipov, graduate student (Eng.), Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya, 5/7, Russian Federation, St Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: vladik_moreak@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.12.2022.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 13.01.2023.
Принята к публикации/accepted for publication 14.01.2023.

Научная статья

УДК 629.5.023:620.178

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.005>

Диаграммы предельных амплитуд цикла для конструкций из полимерных композиционных материалов

Г.Б. Крыжевич^{1,2} g_kryzhevich@ksrc.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ²Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Аннотация. Целью настоящей статьи является разработка основных положений универсального способа построения диаграммы предельных амплитуд цикла (ДПА) по экспериментальным данным, обеспечивающего создание научно-обоснованный подхода к систематизации данных о влиянии несимметрии циклов нагружения на усталостную долговечность слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) в условиях одноосного растяжения-сжатия. При достижении этой цели, получены следующие результаты. Установлено, что формы ДПА для слоистых ПКМ обладают большим разнообразием (по сравнению с металлами, сплавами и другими конструкционными материалами), что объясняется, главным образом, существенным накоплением усталостных повреждений при действии переменных напряжений не только в тех частях цикла нагружения, когда зона потенциального повреждения растягивается, но и когда она сжимается. Установлено, что для слоистых ПКМ в общем случае характерно наличие трех характерных участков ДПА. Предложены нелинейные зависимости для аппроксимации концевых участков и линейные - для среднего участка. Предложен рациональный набор параметров, на основе которых строятся аппроксимационные зависимости. Предложен алгоритм выделения среднего участка диаграммы на основе создания полиномиальной модели ДПА, осуществляемого методами теории планирования эксперимента. На основе этой модели устанавливаются промежутки, в пределах которых происходит медленное изменение предельных амплитуд при изменении средних амплитуд цикла. Суммирование этих промежутков позволяет оценить границы среднего участка ДПА.

Ключевые слова: ресурс конструкций, усталостные испытания образцов, слоистые полимерные композиционные материалы, конструкции из полимерных композиционных материалов, усталостная прочность полимерных композиционных материалов, диаграмма предельных амплитуд цикла,

Для цитирования: Крыжевич Г.Б. Диаграммы предельных амплитуд цикла для конструкций из полимерных композиционных материалов. 2023. № 1 часть 1, С. 59—63. DOI:10.37220/MIT.2023.59.1.005

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.005>

Constant life diagrams for structures from polymer composite materials

Gennady B. Kryzhevich^{1,2} g_kryzhevich@ksrc.ru

¹State marine technical university of Saint-Petersburg, ²Baltic State Technical University "Voenmeh" D.F. Ustinov

Abstract The purpose of this article is to formulate the main provisions of a universal method for constructing a constant life diagram (CLD) based on experimental data, which provides the creation of a scientifically based approach to systematizing data on the effect of asymmetry of loading cycles on the fatigue life of layered polymer composite materials under uniaxial tension-compression conditions. In achieving this goal, aimed at creating a science-based approach to the systematization of experimental data on the effect of asymmetry of loading cycles on the fatigue life of layered polymer composite materials under uniaxial tension-compression conditions, the following results were obtained. It has been established that the forms of a CLD for layered polymer composite materials are very diverse (compared to metals, alloys and other structural materials), which is mainly due to the significant accumulation of fatigue damage under the action of variable stresses, not only in those parts of the loading cycle when the zone of potential damage is stretched, but also when it shrinks. It has been established that, in the general case, layered polymer composite materials are characterized by the presence of three characteristic areas of a CLD. Non-linear dependences are proposed for approximating the end sections and linear ones for the middle section. A rational set of parameters is proposed, on the basis of which approximation dependencies are built. An algorithm for selecting the middle section of the diagram based on the creation of a polynomial model of a diagram, carried out by methods of the theory of experiment planning, is proposed. Based on this model, intervals are established within which the limiting amplitudes slowly change with a change in the average amplitudes of the cycle. The summation of these intervals makes it possible to estimate the boundaries of the middle section of the CLD.

Key words: service life of structures, fatigue testing of specimens, layered polymer composite materials, structures made of polymer composite materials, fatigue strength of polymer composite materials, diagram of limiting cycle amplitudes

For citation: Gennady B. Kryzhevich. Design Diagrams of limiting cycle amplitudes for structures from polymer composite materials, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 59—63. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.005

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят широкое применение в основных силовых элементах судовых конструкций. Исследования

механических свойств ПКМ показывают, что по сравнению с традиционными конструкционными металлами и сплавами композиты имеют серьезные преимущества, связанные в основном с высокими удельными характеристиками статической и

усталостной прочности. Однако закономерности механики усталостного повреждения элементов композитных конструкций находятся до сих пор в начальной стадии изучения. К числу дискуссионных вопросов относится рациональный способ построения по экспериментальным данным диаграмм предельных амплитуд цикла, устанавливающих характер влияния средних напряжений на величины пределов ограниченной выносливости. Опубликованные результаты исследования не дают возможности говорить ни о создании универсальных и надежных способов аппроксимации ДПА, открывающих возможности формулировки практических методов расчета характеристик усталостной прочности конструктивных элементов из слоистых ПКМ и эффективного управления важнейшими физико-механическими характеристиками ПКМ, характеризующими сопротивление усталости, что является серьезным препятствием для внедрения ПКМ в производство судовых конструкций [1]. Вместе с тем для металлических материалов разработан ряд практических рекомендаций, позволяющих приближенно строить ДПА на основе информации об определенных параметрах исследуемого материала или изготовленного из него узла конструкции. Так, например, информация о пределе выносливости материала при симметричном цикле нагружения σ_{-1} и пределе прочности при растяжении позволяет записать выражение для ДПА стали на основе формулы Гудмана, а знание коэффициента чувствительности к асимметрии цикла и предела выносливости σ_{-1} дает возможность составить приближенное выражение для ДПА металлического материала на основе метода Серенсена-Кинасошвили. Подобные универсальные приближенные подходы к построению ДПА слоистых ПКМ отсутствуют.

Целью настоящей статьи является формирование основных положений универсального способа построения ДПА с учетом закономерностей усталостного разрушения силовых элементов судовых многослойных композитных конструкций, обеспечивающего научно-обоснованный подход к систематизации экспериментальных данных о влиянии несимметрии циклов нагружения на усталостную долговечность слоистых ПКМ в условиях одноосного растяжения-сжатия.

1. Известные способы построения диаграмм предельных амплитуд цикла и их недостатки

Как правило, испытания на усталость проводятся при симметричных циклах изменения напряжений (при средних напряжениях цикла σ_m , равных нулю) или при циклах, близких к отнулевым (при σ_m примерно равным амплитудным значениям напряжений в цикле σ_a). Влияние средних напряжений на величины пределов ограниченной выносливости можно приближенно описать на основе построения графиков в координатах $\sigma_a - \sigma_m$, соответствующих определенному уровню долговечности (заданному числу циклов нагружения N). Эти графики или, по другому, ДПА представляют собой построенные по результатам усталостных испытаний зависимости между значениями предельных амплитуд, приводящих к усталостным повреждениям, и средними напряжениями цикла при

заданной долговечности (при фиксированном числе число циклов нагружения N , приводящем к разрушению образца или элемента). Применительно к ПКМ на характер указанной зависимости влияет анизотропия материала и другие его характеристики, что осложняет построение ДПА на основе экспериментальных данных.

Для различных материалов предложено много способов аппроксимации таких диаграмм. В настоящее время для описания усталостного разрушения ПКМ используются модифицированные способы Гербера [1, 2], Гудмана [2], Одингга [3] и аппроксимационные зависимости Бехешти-Харриса-Адама [4]. Результаты сравнительного анализа этих диаграмм, выполненного в работе [1], позволили автору сделать вывод о том, что из всех известных способов аппроксимации диаграмм предельных амплитуд более точное описание влияния средних напряжений цикла на долговечность образцов из углепластика дает подход Бехешти-Харриса-Адама, основанный на использовании ДПА следующего вида:

$$\sigma_{-1} = \frac{\sigma_a \sigma_{uts}^u |\sigma_{ucs}|^v}{(\sigma_{uts} - \sigma_m)^u (|\sigma_{ucs}| + \sigma_m)^v}, \quad (1)$$

где σ_{uts} и σ_{ucs} - напряжения статического разрушения образца или узла конструкции из слоистого ПКМ при растяжении и при сжатии соответственно; u и v - показатели степени, оцениваемые по экспериментальным данным.

Однако такое описание ДПА является неприемлемым в тех случаях, когда на значительном интервале значений средних напряжений цикла σ_m зависимость амплитудных значений напряжений σ_a от σ_m является слабо выраженной или, другими словами, когда диаграмма имеет достаточно пологий максимум. Подобные зависимости приводятся в работах [5-9]. Пример, заимствованный из работы [5], представлен на рис. 1 (график 2). В этом случае аппроксимация по Бехешти-Харрису-Адаму позволяет удовлетворительно описать зависимость 1 (поскольку график функции (1) имеет один достаточно крутой максимум) и является неприемлемой для зависимости 2.

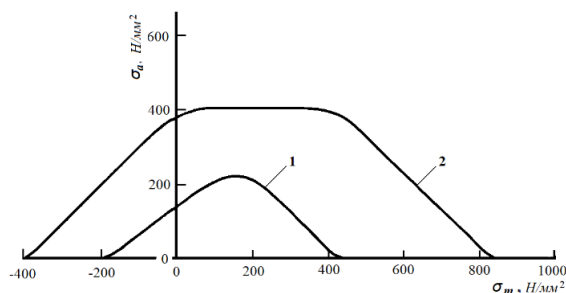


Рис. 1. Сравнение диаграмм предельных амплитуд цикла, соответствующих долговечности 10^7 циклов, для двух слоистых углепластиков на основе поверхностно обработанных высокопрочных волокон [6]: 1 – композит из 11 слоев ортогонально уложенных листов препрега, смола Эпикот 828/DDS/BF₃400; 2 – однонаправленный композит, мокрая укладка, смола Эпикот 828/MNA/BDMA

2. Особенности усталостного повреждения ПКМ, влияющие на форму диаграммы

Согласно результатам многочисленных экспериментов, композиционные материалы при циклических нагружениях деформируются и разрушаются вследствие накопления дефектов различной природы. В отличие от металлических материалов такое накопление происходит при действии переменных напряжений, как растягивающих зону потенциального повреждения (горячую точку), так и сжимающих. Поэтому область определения функции (1) для ПКМ находится в интервале от σ_{ucs} до σ_{uts} (от предельного напряжения сжатия до предельного напряжения растяжения исследуемого материала), а мера усталостного повреждения определяется различными процессами деградации материала, включающими разрушение волокон, расслоение, разрушение матрицы, совместное разрушение матрицы и волокон, отрывы на поверхности раздела волокон и матрицы, повторные включения. Последовательность указанных повреждающих процессов, характерных для разрушения при разных видах деформированного состояния (растяжения, сжатия, сдвига и сложных форм), может быть самой разнообразной. Отдельно целесообразно коротко обсудить своеобразие усталостного повреждения при действии сжимающих напряжений, связанное с многообразием форм его осуществления. В частности, возможны следующие формы:

- микровыпучивание волокон с сохранением упругого состояния матрицы;
- микровыпучивание волокон после перехода матрицы в пластическое состояние;
- микровыпучивание волокон после нарушения связи между компонентами;
- микровыпучивание слоя;
- сдвиговое разрушение;
- разделение слоев из-за поперечного растяжения в направлении толщины слоя (поперечное расслаивание от растяжения).

Эти виды разрушения проиллюстрированы на рис. 2—4.

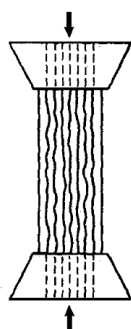


Рис. 2. Форма микровыпучивания при продольном сжатии

Микровыпучивание волокон при упругих напряжениях в матрице возникает лишь в слоях с весьма малой объемной долей волокон. Переход матрицы в пластическое состояние и разделение компонентов практически возникает при объемной доле волокон, превышающей 40%.

Экспериментальные данные по продольному сжатию показывают, что слой (даже когда

предотвращено его макровыпучивание) не может выдерживать достаточно высокую сжимающую нагрузку, чтобы достигнуть полной прочности волокон на сжатие. То есть, при разрушении слоя от сжимающей нагрузки напряжения в волокнах заметно меньше их ожидаемой прочности на сжатие. Результаты экспериментов [5, с.125] показывают, что слой при их сжатии могут накапливать повреждения с реализацией сдвиговой схемы разрушения, изображенной на рис. 4б. Данные по разрушающим напряжениям, полученные из этих экспериментов, близки к данным, получаемым при продольном растяжении.

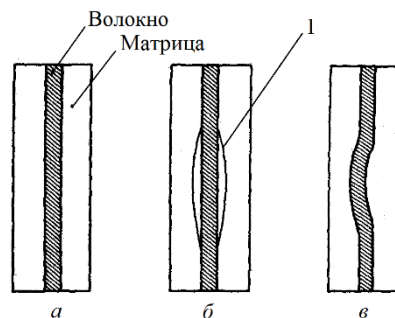


Рис. 3. Разрушение при продольном сжатии с расслаиванием (нарушением связи между волокнами и матрицей): а — неповрежденная структура; б — расслаивание или образование пластической области (1 — граница пластической области); в — волокно, потерявшее устойчивость.

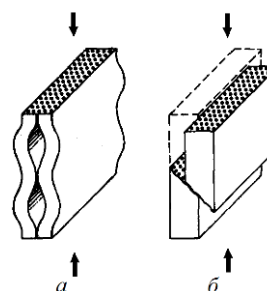


Рис. 4. Формы разрушения слоя при продольном сжатии: а — выпучивание слоя или расщепление; б — сдвиговая форма.

В конечном итоге при развитии усталостных повреждений ПКМ вредоносная роль средних в цикле сжимающих напряжений сопоставима с ролью средних растягивающих напряжений. Это обстоятельство часто отражается на форме ДПА, вызывая наличие в ней участков с большими углами наклона к оси абсцисс на небольших удалениях от точек с абсциссами, равными σ_{ucs} и σ_{uts} , а также пологий максимум при относительно малых значениях средних растягивающих напряжений (кривая 2 на рис. 1).

3. Универсальный способ построения диаграммы

Для математического описания ДПА произвольного вида рекомендуется следующий подход. На основе анализа расположения экспериментальных точек в координатах $\sigma_a - \sigma_m$, характерного для определенного вида стеклопластика или углепластика, необходимо установить наличие пологого максимума или

медленного монотонного изменения σ_a при росте σ_m . При существовании такого участка (с положим максимумом или монотонным изменением σ_a) необходимо определить его границы.

Количественным признаком наличия пологого максимума может быть изменение предельных амплитуд менее чем на 1% в пределах интервала изменения σ_m , составляющего $0,07(|\sigma_{ucs}| + \sigma_{uts})$. Такое изменение устанавливается на основе построения полиномиальной модели ДПА, осуществляемого методами теории планирования эксперимента. Признаком наличия монотонного изменения σ_a может быть изменение угла наклона полиномиальной модели к оси абсцисс менее чем на 1,5% в пределах интервала изменения σ_m , составляющего $0,07(|\sigma_{ucs}| + \sigma_{uts})$.

Установленные таким образом границы зоны описанного выше участка σ_m^- и σ_m^+ , а также соответствующие им значения предельных амплитуд σ_a^- и σ_a^+ используются для линейной аппроксимации диаграммы на указанном участке

$$\sigma_a = \sigma_a^- + k(\sigma_m - \sigma_m^-), \quad (2)$$

где $k = \frac{(\sigma_a^+ - \sigma_a^-)}{(\sigma_m^+ - \sigma_m^-)}$ (при отсутствии монотонного изменения σ_a коэффициент $k = 0$).

Для двух оставшихся участков ДПА (расположенных слева от ординаты σ_m^- и справа от ординаты σ_m^+) используются соответственно аппроксимации вида

$$\sigma_a = \sigma_a^- \left[1 - \left(\frac{\sigma_m - \sigma_m^-}{\sigma_{ucs} - \sigma_m^-} \right)^{2\alpha_1} \right]; \quad (3)$$

$$\sigma_a = \sigma_a^+ \left[1 - \left(\frac{\sigma_m - \sigma_m^+}{\sigma_{uts} - \sigma_m^+} \right)^{2\alpha_2} \right], \quad (4)$$

где α_1 и α_2 - показатели степени, устанавливаемые на основе экспериментальных данных.

Приведем пример такого математического описания ДПА на основе зависимостей (2)-(4). На рис. 5 представлены результаты аппроксимации приведенных в работе [10] данных испытаний образцов для образцов со свободным отверстием из углепластика AS4-PW с параметрами укладки $[\pm 45 / 90 / \pm 45 / 0 / \pm 45]_2s$. В зонах пологого максимума значения предельных амплитуд считаются постоянными ($\sigma_a = const$). Принято, что показатели степени $\alpha_1 = \alpha_2 = 2,8$.

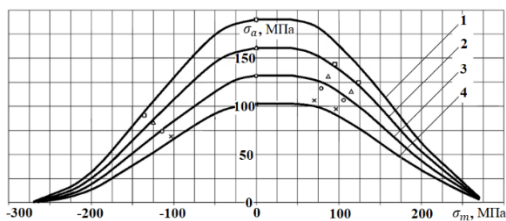


Рис. 5. ДПА для образцов из углепластика, представленные аппроксимирующими кривыми и экспериментальными точками, соответствующими следующим числам циклов нагружения N : 1 (□) — $N = 10^3$; 2 (Δ) — $N = 10^4$; 3 (○) — $N = 10^5$; 4 (×) — $N = 10^6$.

Заключение

В работе предложен универсальный способ построения ДПА, обеспечивающих прогнозирование усталостной прочности конструкций из ПКМ. Такие диаграммы, при наличии достоверной информации о влиянии характеристик ПКМ на их параметры (на константы $\sigma_m^-, \sigma_m^+, \alpha_1, \alpha_2$ и k), могут использоваться как инструмент прогнозирования усталостной долговечности конструкций при схемах нагружения, характеризуемых коэффициентами асимметрии цикла или средними напряжениями σ_m , для которых нет экспериментальных данных. Имеющиеся немногочисленные данные результатов испытаний позволяют предполагать, что в подавляющем большинстве случаев (как и в рассмотренном выше примере) можно считать, что $k = 0$ и $\alpha_1 = \alpha_2$. Это обстоятельство позволит, по-видимому, существенно облегчить накопление достоверной информации.

На основе полученных выше результатов можно сформулировать следующие выводы:

- описанные в технической литературе формы ДПА для слоистых ПКМ обладают большим разнообразием (по сравнению с металлами, сплавами и другими конструкционными материалами), что объясняется главным образом существенным накоплением усталостных повреждений при действии переменных напряжений не только во временных интервалах цикла нагружения, когда зона потенциального повреждения материала или конструкции растягивается, но и когда она сжимается;

- для слоистых ПКМ в общем случае характерно наличие трех участков ДПА — двух концевых участков с большими углами наклона к оси абсцисс на небольших удалениях и среднего участка с пологим максимумом. Концевые участки целесообразно аппроксимировать с использованием нелинейных зависимостей (3) и (4), а средний участок с помощью линейной зависимости (2) (либо предполагать, что на этом участке $\sigma_a = const$). В частных случаях средний участок может отсутствовать. Важнейшими параметрами подобной аппроксимации являются значения статической прочности узлов конструкции при сжатии σ_{ucs} и при растяжении σ_{uts} , границы зоны пологого максимума σ_m^- и σ_m^+ и соответствующие им значения предельных амплитуд σ_a^- и σ_a^+ , а также показатели степени α_1 и α_2 ;

- для выделения среднего участка целесообразно выполнять построение полиномиальной модели ДПА, осуществляемое методами теории планирования эксперимента на основе опытных данных. На основе этой модели устанавливаются промежутки, в пределах которых происходит медленное изменение предельных амплитуд при изменении средних амплитуд цикла. Суммирование этих промежутков позволяет оценить границы среднего участка ДПА.

Литература

- Стрижиус В.Е. Некоторые закономерности усталостного разрушения элементов композитных авиаконструкций. Композиты и наноструктуры, Том 8 (Volume 8), № 4, 2016.
- Tanimoto T., Saclao A. Fatigue properties of laminated glass fiber composites material. 29th Annual Technical Conf. SPI.

- 1977.
3. Одинг И.А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. М.: Mashgiz, 1962.
 4. Beheshty M.H., Harris B. and Adam T. An empirical fatigue-life model for high-performance fiber composites with and without impact damage. *Compos A: Appl Sci & Manuf*, A30. - 1999. P. 971-987.
 5. Композиционные материалы // Под ред. Браутмана Л. и Крока Р. Том 5, Разрушение и усталость. М: Мир, 1978.
 6. Owen M.J., Morris S. *Int. Conf. Carbon Fibres, Their Composites and Appl.*, Paper 51, *Plastics Inst.*, England, London, 1971.
 7. Salkind M. J. Fatigue of composites. In: *Composite Materials: Testing and Design*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1972. Vol. 497. P. 143–169.
 8. Dew-Hughes D., Way J. L. Fatigue of fiber-reinforced plastics: a review. *Composites*, 1973, vol. 4, Iss. 4. P. 167–173.
 9. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. М.: Мир, 1982.
 10. Tomblin J. and Seneviratne W. Determining the Fatigue Life of Composite Aircraft Structures Using Life and Load-Enhancement Factors. Report DOT/FAA/AR-10/6. 2011.

References

1. Strizhius V.Ye. Nekotoryye zakonomernosti ustalostnogo razrusheniya elementov kompozitnykh aviakonstruktsiy. Kompozity i nanostruktury [Some laws of fatigue strength of airframe composite elements], Tom 8 (Volume 8), № 4, 2016.
2. Tanimoto T., Saclao A. Fatigue properties of laminated glass fiber composites material. 29th Annual Technical Conf. SPI. 1977.
3. Oding I.A. Dopuskayemyye napryazheniya v mashinostroyenii i tsiklicheskaya prochnost' metallov [Permissible stresses in mechanical engineering and cyclic strength of metals]. М.: Mashgiz, 1962.
4. Beheshty M.H., Harris B. and Adam T. An empirical fatigue-life model for high-performance fiber composites with and without impact damage. *Compos A: Appl Sci & Manuf*, A30. - 1999. P. 971-987.
5. *Composite materials*. Edited by Lawrence J., Broutman. Volume 5. Fracture and Fatigue, Edited by Richard H., Krock P. R., Academic Press, New York and London, 1974.
6. Owen M.J., Morris S. *Int. Conf. Carbon Fibres, Their Composites and Appl.*, Paper 51, *Plastics Inst.*, England, London, 1971.
7. Salkind M. J. Fatigue of composites. In: *Composite Materials: Testing and Design*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1972. Vol. 497. P. 143–169.
8. Dew-Hughes D., Way J. L. Fatigue of fiber-reinforced plastics: a review. *Composites*, 1973, vol. 4, Iss. 4. P. 167–173.
9. Fudzii T., Dzako M. Mekhanika razrusheniya kompozitsionnykh materialov [Fracture and Mechanics of Composite Materials]. М.: Mir, 1982.
10. Tomblin J. and Seneviratne W. Determining the Fatigue Life of Composite Aircraft Structures Using Life and Load-Enhancement Factors. Report DOT/FAA/AR-10/6. 2011.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Геннадий Брониславович Крыжевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3; e-mail: g_kryzhevich@ksrc.ru; профессор кафедры механики деформируемого твердого тела, Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова, 190005, Россия, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1; e-mail: filatov_ar@voenmeh.ru

Gennadiy B. Kryzhevich, Dr.Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of ship design, St. Petersburg state marine technical University, Lotmaskaya, 3, St. Petersburg, 1960121, Russian Federation; e-mail: g_kryzhevich@ksrc.ru; Professor of the Department of solid mechanics, Baltic State Technical University "Voenmekh", Krasnoarmeyskaya street, 1, St. Petersburg, 190005, Russian Federation; e-mail: kryzhevich_gb@voenmeh.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 19.01.2023.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.02.2023.
Принята к публикации/accepted for publication 28.02.2023.

Научная статья

УДК 532.582.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.006>

Обоснование применимости полуэмпирического метода расчета гидродинамических профилей для прогнозирования отрывных и переходных явлений

Д.С. Ромадин¹ kgm@smtu.ru, А.Ю. Яковлев¹ kgm@smtu.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет.

Аннотация. Целью работы является тестирование разработанного ранее полуэмпирического метода расчета характеристик гидродинамических профилей в части моделирования ламинарно-турбулентного перехода и отрыва пограничного слоя. Полуэмпирический метод основан на расчете потенциального обтекания профиля с помощью метода граничных интегральных уравнений и моделировании пограничного слоя интегральным методом. В качестве эталонного решения используются результаты CFD расчета обтекания профиля NACA0018 с помощью RANS метода в пакете OpenFOAM. Дано описание способа построения сетки, проведена проверка сеточной сходимости. С помощью указанных методов проведены сопоставительные расчеты коэффициентов подъемной силы и сопротивления профиля в диапазоне докритических углов атаки при двух значениях числа Рейнольдса, показано их хорошее согласование. Далее проведено сопоставление величин толщины потери импульса, положения точки ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое на профиле и положение точки отрыва пограничного слоя. Подтверждена хорошая точность прогнозирования этих характеристик с помощью полуэмпирического расчетного метода.

Ключевые слова: гидродинамический профиль, расчет, полуэмпирический метод, RANS метод, ламинарно-турбулентный переход, пограничный слой, отрыв, толщина потери импульса

Для цитирования: Ромадин Д.С., Яковлев А.Ю., Обоснование применимости полуэмпирического метода расчета гидродинамических профилей для прогнозирования отрывных и переходных явлений. 2023. № 1 часть 1, С. 64—72. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.006

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.006/>

Applicability substantiation of the semi-empirical hydrofoils calculation method for predicting separation and transient phenomena

Dmitry S. Romadin¹ kgm@smtu.ru, Aleksey Yu. Yakovlev¹ kgm@smtu.ru

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The aim of the work is to test the previously developed semi-empirical method for calculating the characteristics of hydrofoil sections in terms of modeling the laminar-turbulent transition and boundary layer separation. The semi-empirical method is based on the calculation of the potential flow around the hydrofoil section using the boundary integral equations method and modeling of the boundary layer by the integral method. As a reference solution, the results of CFD calculation of flow around the NACA0018 hydrofoil sections using the RANS method in the OpenFOAM package are used. The description of the grid construction method is given, the grid convergence is checked. Comparative calculations of the hydrofoil section lift and drag coefficients in the range of subcritical angles of attack at two values of the Reynolds number were carried out by these methods. The good agreement of the results was shown. Further, the values of the momentum loss thickness, the position of the laminar-turbulent transition point in the boundary layer on the hydrofoil section and the position of the boundary layer separation point were compared. The good accuracy of predicting these characteristics using a semi-empirical calculation method has been confirmed.

Keywords: hydrofoil section, calculation, semi-empirical method, RANS method, laminar-turbulent transition, boundary layer, separation, momentum loss thickness

For citation: Dmitry S. Romadin, Aleksey Yu. Yakovlev, Applicability substantiation of the semi-empirical hydrofoils calculation method for predicting separation and transient phenomena. 2023. № 1 part 1, P. 64—72. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.006

Введение

Полуэмпирические методы расчета характеристик гидродинамических профилей находят применение при разработке инженерных методик, в том числе алгоритмов проектирования различных устройств. Ранее в работах [1] [2] был разработан такой метод, в дальнейшем он использовался для разработки методики пересчета результатов модельных испытаний гребных винтов на натуре [3]. Ключевой особенностью метода [1] [2],

обеспечивающей требуемую точность, является моделирование момента отрыва пограничного слоя и ламинарно-турбулентного перехода в нем. Модель этих явлений реализована на основе теоретических положений изложенных в [4] и была уточнена в процессе разработки метода.

Как было показано, разработанный полуэмпирический метод обеспечивает хорошую точность прогнозирования силовых характеристик профиля для натуральных и модельных чисел Рейнольдса. Косвенно это подтверждает

правильность моделирования переходных и отрывных явлений в пограничном слое. Однако, было бы желательно провести непосредственное сопоставление расчетных характеристик пограничного слоя с экспериментальными данными. К сожалению, в силу недостатка опубликованных экспериментальных данных такое сопоставление было осуществлено в ограниченном объеме.

Моделирование переходных и отрывных явлений представляет собой непростую задачу, для решения которой ведутся разработки математических моделей различной сложности [5]. Среди них можно выделить группы относительно простых инженерных моделей [6] (к ним относится и рассматриваемый метод), апробированных моделей включенных в пакеты для CFD расчетов [7] и сложных исследовательских моделей, учитывающих специфические особенности происходящих процессов [5]. Качество и возможности современных моделей реализованных в CFD пакетах можно считать достаточными для решения инженерных задач [8], поэтому полученные с их помощью результаты можно использовать в качестве эталонных при тестировании инженерных моделей. Проведение такого тестирования инженерного метода [1] [2] с целью обоснования его применимости для моделирования переходных и отрывных явлений в пограничном слое и является целью данной работы.

Полуэмпирический метод расчета обтекания гидродинамического профиля

Рассматриваемый полуэмпирический метод [1] [2] относится к так называемым интегральным методам расчета пограничного слоя. Интегральные методы представляют собой простой, быстрый и достаточно точный способ моделирования пограничного слоя на поверхности крыла. Интегральными эти методы называются потому, что в них оперируют величинами, полученными в результате интегрирования скоростей поперек пограничного слоя. Традиционно используются следующие интегральные характеристики пограничного слоя: δ – толщина пограничного слоя, δ^* – толщина вытеснения, δ^{**} – толщина потери импульса, δ^{***} – толщина потери энергии.

Из них непосредственно используются в уравнениях, описывающих течение две величины: толщина вытеснения, характеризующая отклонение линий тока вследствие влияния пограничного слоя

$$\delta^* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{v_x}{V}\right) dy \quad (1)$$

толщина потери импульса характеризует потерю количества движения, необходимого для преодоления сил трения:

$$\delta^{**} = \int_0^{\delta} \frac{v_x}{V} \left(1 - \frac{v_x}{V}\right) dy \quad (2)$$

В этих выражениях интегрирование по координате y ведется поперек пограничного слоя, соответственно координата x направлена вдоль него. За толщину пограничного слоя δ принимают расстояние от поверхности тела, где скорость потока v_x в пограничном слое практически совпадает со

скоростью внешнего потенциального течения V . Часто принимают, что на внешней границе пограничного слоя $v_x = 0,995 \cdot V$.

Как следует из выражений (1) и (2) для расчета пограничного слоя интегральным методом необходимо знать распределение скорости $V(x)$ во внешнем потенциальном потоке. Эта скорость может быть получена с помощью методов граничных интегральных уравнений (ВЕМ методов). В данном случае с этой целью применялся метод описанный в [8].

В теории пограничного слоя показано [4], что величина толщины потери импульса может быть определена на участке с ламинарным режимом течения по формуле

$$\bar{\delta}_L^{**} = \frac{0,67}{\sqrt{\text{Re}}} \frac{|\bar{V}_t|^{0,507}}{|\bar{V}|^{3,180}} \cdot \sqrt{\int_0^{S_t} |\bar{V}|^{4,35} dS} \quad (3)$$

а на участке с турбулентным режимом течения по формуле

$$\bar{\delta}_T^{**} = \frac{0,01529}{\sqrt[7]{\text{Re}}} \frac{1}{|\bar{V}|^{3,04}} \cdot \left(\int_{S_t}^{S_0} |\bar{V}|^{3,545} dS \right)^{\frac{6}{7}} \quad (4)$$

где черта сверху обозначает обезразмеривание величин: скорости отнесены к скорости набегающего потока, линейные размеры – к длине хорды профиля. Число Рейнольдса Re построено по скорости потока и длине хорды. Индекс t обозначает точку ламинарно-турбулентного перехода.

Имея результаты расчета профиля потенциальным потоком, полученные с помощью ВЕМ метода и характеристики пограничного слоя (3) (4) можно определить силовые характеристики профиля.

При этом коэффициент сопротивления профиля C_D вычисляется по формуле Сквайра-Юнга [1]:

$$C_D = 2(\bar{V}_0)^{3,2} \cdot \bar{\delta}_0^{**} \quad (5)$$

где индексом «0» обозначены величины на выходящей кромке профиля. Причем под величиной потери импульса понимается ее суммарное значение для нагнетающей и засасывающей сторон профиля.

Для определения коэффициента подъемной силы C_L используется линейная зависимость, [2] которая с хорошей точностью работает на докритических углах атаки

$$C_L = \left(\frac{dC_L}{d\alpha} \right)_I \cdot [\alpha - \Delta\alpha - \alpha_{0I}] \quad (6)$$

Характеристики, входящие в это выражение и обозначенные индексом I определяются в рамках расчета с помощью ВЕМ метода в идеальной жидкости: $(dC_L/d\alpha)_I$ – наклон кривой подъемной силы в идеальной жидкости, α_{0I} – угол нулевой подъемной силы по данным расчета в идеальной жидкости.

Характеристики пограничного слоя входят в выражение (6) через поправку $\Delta\alpha$, которая зависит от толщины потери импульса на засасывающей поверхности выходящей кромки профиля [2]:

$$\Delta\alpha = \frac{13}{11} \cdot \delta_{0s}^{**} \quad (7)$$

Таким образом, наличие поправки (7) приводит к тому, что формула (6) перестает быть линейной зависимостью от угла атаки и в принципе позволяет моделировать нелинейные эффекты, связанные с выходом профиля на критические углы атаки.

Величина толщины потери импульса (3) и (4) зависит от положения точки ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое. Для учета ламинарно-турбулентного перехода используется известный критерий Эпплера [4], в который входят выражения для формпараметров модифицированные с учетом экспериментальных данных по обтеканию профилей [1].

Для оценки момента отрыва пограничного слоя используется способ [1], основанный на оценке величины соответствующего формпараметра [4]. Выражения для формпараметра и его критическое значения зависят от режима течения в пограничном слое, интегральных характеристик пограничного слоя и распределения скорости во внешнем потенциальном потоке. В том числе моделируется ситуация когда оторвавшийся ламинарный пограничный слой турбулизуется и вновь присоединяется к поверхности, так как критерий отрыва турбулентного пограничного слоя еще не достигнут [1].

Проведенные ранее исследования [1], [2], [10] показали, что учет отрыва пограничного слоя и ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое позволяют существенно повысить точность расчетных оценок силовых характеристик профилей. В то же время непосредственной проверки точности определения моментов отрыва пограничного слоя и ламинарно-турбулентного перехода провести затруднительно, в связи с недостаточностью экспериментальных данных. Подобная проверка может быть осуществлена путем сопоставления с результатами CFD расчетов.

CFD расчет обтекания профиля

Для CFD расчета обтекания профиля используется пакет OpenFOAM. OpenFOAM (Open source Field Operation and Manipulation) – программное обеспечение с открытым исходным кодом, разработанное компанией OpenCFD и предназначенное для численного решения задач механики сплошных сред [11].

CFD расчет течений жидкости состоит из ряда этапов. На первом этапе производится задание расчетной области и построение в ней расчетной сетки.

Расчетная область представлена на рис. 1. Она определяется следующими геометрическими параметрами: длина $l_1=8$ м, ширина $l_2=0.04$ м, высота $l_3=5$ м. По длине область разбивается на 400 ячеек, по высоте на 250 ячеек. Ширина расчетной области равна 1 ячейке, для соблюдения условия двумерной задачи.

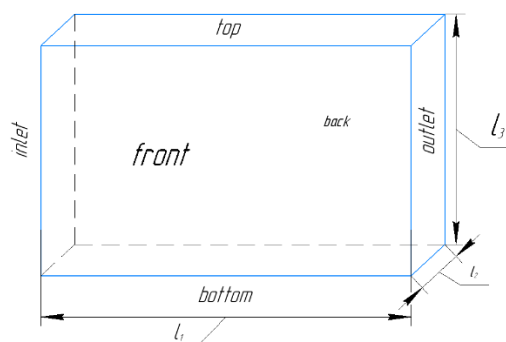


Рис. 1. расчетная область.

Операции по построению сетки производились с помощью утилит blockMesh и snappyHexMesh [11]. Утилита blockMesh создает параметрические сетки с градуировкой и изогнутыми краями. Принцип построения, на котором основан blockMesh, заключается в разложении геометрии домена на набор из одного или более трехмерных шестигранных блоков [11]. Утилита snappyHexMesh автоматически генерирует трехмерные сетки, содержащие шестигранники (hex) и разделенные шестигранники (split-hex), из геометрии триангулированной поверхности в формате стереолитографии (STL). Сетка приблизительно соответствует поверхности путем итеративного уточнения исходной сетки и преобразования результирующей шестигранной сетки в поверхность. Пример построенной расчетной сетки приведен на рис. 2.

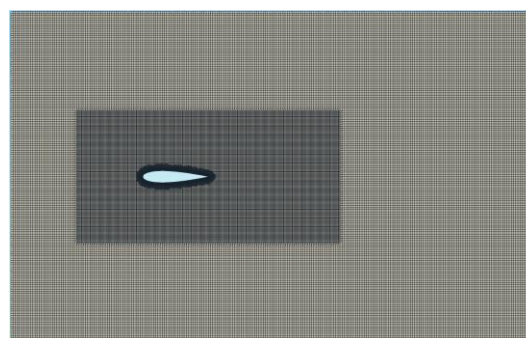


Рис. 2. Пример расчетной сетки.

На границах расчетной области задаются условия, необходимые для получения правильной картины течения.

На входной границе «inlet», а так же на верхней («top») и нижней («bottom») границах (см. рис. 1) выставляется фиксированное значение компонент скорости потока и требование постоянства давления p по нормали к поверхности:

$$\begin{aligned} v_x &= V_0, \\ v_y &= v_z = 0, \\ \frac{\partial p}{\partial \vec{n}} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

где V_0 – величина скорости набегающего потока, которая в расчетах принималась равной 35 м/с (соответствующее число Рейнольдса $Re=2.4 \cdot 10^6$) и 5 м/с (соответствующее число Рейнольдса $Re=3.5 \cdot 10^5$).

На выходной границе «outlet» задается условие Неймана для скорости, т.е. значение скорости ниже по потоку не должно изменяться по отношению к последнему ряду ячеек. Для давления на этой границе выставляется условие Дирихле, то есть давление должно равняться заданному постоянному давлению p_0 в окружающей среде:

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{n}} = 0, \quad (9)$$

$$p = p_0$$

На передней («front») и задней («back») стенках формально никакие условия не выставляются, так как рассматривается случай плоского течения. Фактически это означает выполнение условия непротекания жидкости через эти стенки.

Профиль крыла так же является неподвижной непроницаемой поверхностью, однако для него в вязкой жидкости должно выставляться условие прилипания, состоящее в равенстве скорости на поверхности профиля нулю. Кроме того, давление на поверхности профиля должно удовлетворять условию постоянства по нормали к поверхности:

$$v_x = v_y = v_z = 0,$$

$$\frac{\partial p}{\partial \bar{n}} = 0 \quad (10)$$

В процессе решения задачи осуществляется решение уравнений Навье-Стокса в осреднении Рейнольдса. При этом для моделирования турбулентного течения используется модель турбулентности kOmegaSST. В состав модели kOmegaSST входит два уравнения. Это означает, что в дополнение к уравнениям сохранения, в модели решаются ещё два уравнения переноса, учитывающих конвекцию и диффузию турбулентной энергии. Двумя переносимыми переменными являются турбулентная кинетическая энергия (k), которая определяет энергию в турбулентности, и удельная скорость турбулентной диссипации (ω), которая определяет скорость диссипации на единицу турбулентной кинетической энергии. Стандартная модель $k-\omega$ относится к низкорейнольдсевым моделям турбулентности. Таким образом, она должна быть эффективна при анализе пристенных течений и в частности течения в пограничном слое.

Турбулентная кинетическая энергия k и турбулентная вязкость μ_t определяются с использованием граничного условия $kqRWallFunction$. Для определения степени диссипации турбулентной энергии ω используется $\omega WallFunction$ [12]. Интенсивность турбулентности задается равной 1%, коэффициент вихревой вязкости $\mu_t / \mu = 100$.

Важным этапом подготовки к проведению расчетов является проверка сеточной сходимости. Эта проверка заключается в изучении зависимости решения от разрешения пространства с помощью расчетной сетки. Наиболее часто сеточная сходимость проверяется путем измельчения сетки. В

данном случае измельчение сетки выполнялось с перестройкой начальной сетки. Данный подход выбран из-за небольшого времени расчета двумерной сетки. Преимуществом данного метода является измельчение каждой ячейки всего расчетного объема, что исключает ошибки за зоной адаптации [13]. Густота сетки характеризуется безразмерным параметром y^+ :

$$y^+ = \frac{\sqrt{\rho \cdot \tau_w}}{\mu} y \quad (11)$$

где y – толщина ячейки вблизи стенки, τ_w – касательные напряжения на стенке, μ – коэффициент вязкости, ρ – плотность жидкости.

Исследование проводилось при вариации y^+ в диапазоне от 30 до 300. За характерную величину, по которой осуществляется контроль сходимости, взято значение коэффициента силы сопротивления на профиле C_D . График, иллюстрирующий влияние размера ячейки на величину C_D представлен на рисунке 3. Из него следует, что при уменьшении значения y^+ до 40 ниже, сила на профиле практически становится постоянной, что говорит о достижении сеточной сходимости. Исходя из этого, величина $y^+=40$ была принята при проведении последующих расчетов.

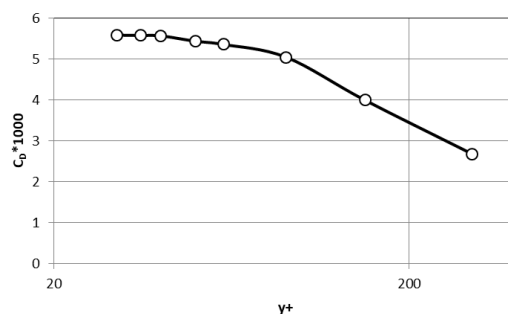


Рис.3. Иллюстрация сеточной сходимости расчета (зависимость коэффициента силы на профиле от величины y^+).

Тестовые расчеты

Расчетные исследования проводились для симметричного профиля крыла NACA0018. При этом рассматривались два числа Рейнольдса: $Re=2.4 \cdot 10^6$ и $Re=3.5 \cdot 10^5$ и ряд углов атаки в диапазоне от 0 до 10 градусов. Отдельно рассматривался критический угол атаки 17 градусов, при котором наблюдается резкое снижение подъемной силы.

В результате расчетов были получены величины подъемной силы и силы сопротивления. Для сопоставления с экспериментальными данными [14] и расчетом с помощью интегрального метода, использовались безразмерные коэффициенты сил, определяемые традиционным образом:

$$C_D = 2 \frac{R_x}{\rho V_0^2 b \ell_2} \quad (12)$$

$$C_L = 2 \frac{R_Y}{\rho V_0^2 b \ell_2}$$

где R_x – сила трения, R_Y – подъемная сила, ρ – плотность воздуха, b – длина хорды профиля, ℓ_2 – ширина расчетной области (фиктивный размах крыла).

На рис. 4 и 5 полученные расчетные зависимости коэффициентов подъемной силы и сопротивления от угла атаки при числе Рейнольдса $Re=2.4 \cdot 10^6$ сопоставлены с экспериментальными данными [14] и результатами оценки с помощью описанного выше полуэмпирического метода расчета [1], [2]. Аналогичные зависимости для числа Рейнольдса $Re=3.5 \cdot 10^5$ представлены на рис. 6 и 7.

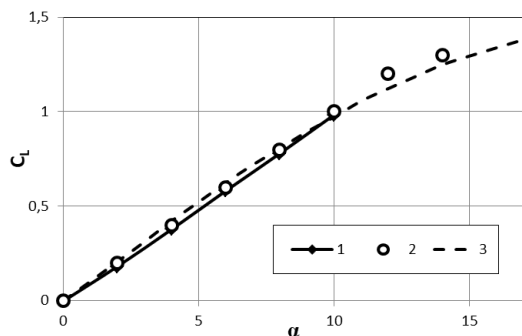


Рис. 4. Сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей коэффициента подъемной силы C_L от угла атаки α для профиля NACA0018 при числе Рейнольдса $Re=2.4 \cdot 10^6$.

1 – CFD расчет, 2 – эксперимент, 3 – расчет полуэмпирическим методом.

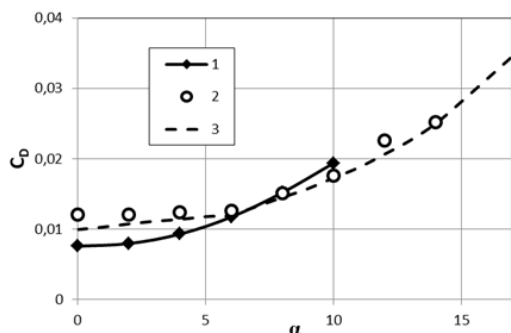


Рис. 5. Сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей коэффициента сопротивления C_D от угла атаки α для профиля NACA0018 при числе Рейнольдса $Re=2.4 \cdot 10^6$. Обозначения как на рис. 4.

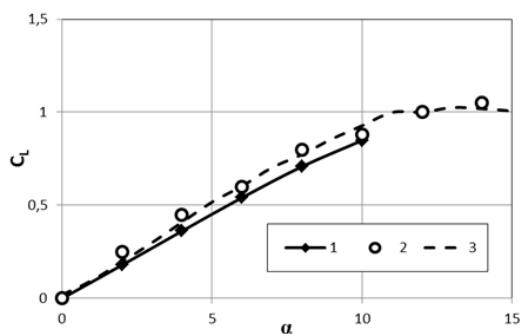


Рис. 6. Сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей коэффициента подъемной силы C_L от угла атаки α для профиля NACA0018 при числе Рейнольдса $Re=3.4 \cdot 10^5$. Обозначения как на рис. 4.

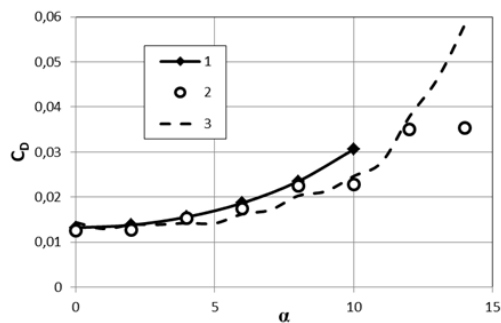


Рис. 7. Сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей коэффициента сопротивления C_D от угла атаки α для профиля NACA0018 при числе Рейнольдса $Re=3.4 \cdot 10^5$. Обозначения как на рис. 4.

Анализируя представленные сопоставления расчетов и экспериментальных данных можно констатировать, что как CFD расчет, так и интегральный метод расчета пограничного слоя позволяют обеспечить хорошую точность прогнозирования. Таким образом, можно считать, что характер течения и процессы в пограничном слое на профиле моделируемые с помощью двух разных методов должны соответствовать друг другу.

Здесь интересно отметить, что если сравнивать между собой два расчетных метода, то более простой интегральный метод расчета показывает лучшее согласование с экспериментом. С одной стороны это говорит о хорошей отработке расчетной схемы [1] [2] применительно к стандартным крыльевым профилям. С другой стороны, следует иметь в виду, что в интегральной расчетной схеме есть эмпирические параметры, которые специально подбирались для обеспечения согласования с экспериментальными данными по профилям [1]. Теоретически подобную подстройку можно сделать и применительно к CFD методу, только здесь число подбираемых параметров оказывается значительно большим.

Анализ характеристик пограничного слоя

В отличие от метода интегрирования пограничного слоя, CFD расчет дает представление о полной картине течения как внутри пограничного слоя, так и во внешнем потоке. На рис. 8 в качестве примера представлены поля давлений, полученные на профиле при различных углах атаки. На этих картинах хорошо видны области повышенного давления в передней критической точке (синий цвет) и в области формирования следа за профилем, а так же разрежение на засасывающей поверхности профиля (красный цвет). Видно, что с ростом угла атаки на засасывающей стороне профиля в его хвостовой части начинает расти область подторможенного потока. Причиной возникновения этой области служит отрыв пограничного слоя на засасывающей поверхности профиля.

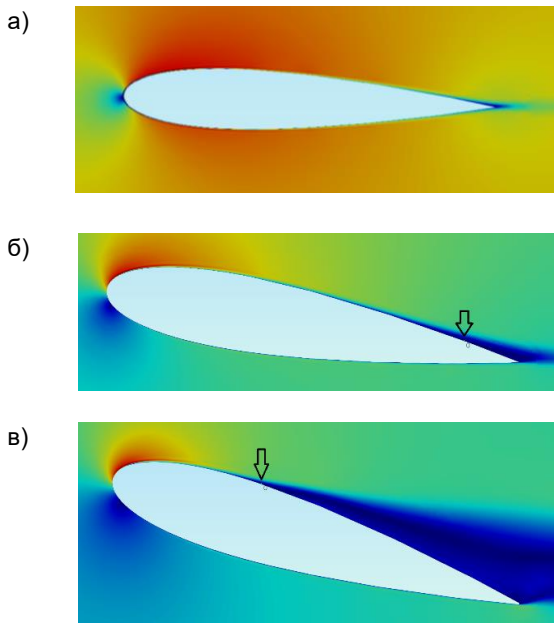


Рис. 8. Расчетное распределение давления в жидкости при обтекании профиля NACA0018 при числе Рейнольдса $Re=2.4 \cdot 10^6$. Углы атаки: а – 2° , б – 10° , в – 17° .

Зная распределение скоростей в потоке, можно непосредственно определить характеристики пограничного слоя, пользуясь формулами (1) и (2). Такие расчеты были выполнены для толщины вытеснения на выходящей кромке профиля, применительно к засасывающей и нагнетающей сторонам профиля. С помощью фильтра plotOverLine были получены значения скорости в пограничном слое. После чего, используя функцию calculator рассчитывались величины толщины потери импульса и толщины вытеснения. На рис. 9 и 10 представлены сопоставления расчетных величин толщины потери импульса, полученной с помощью интегрального метода и CFD расчета. Результаты представлены для двух чисел Рейнольдса.

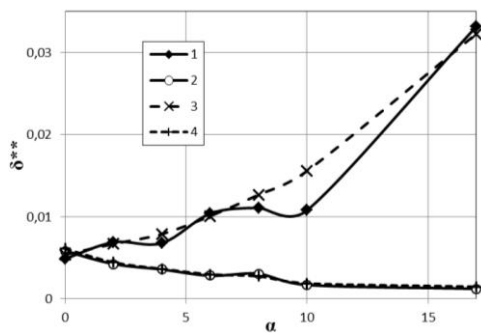


Рис. 9. Сопоставление расчетных величин толщин потери импульса, полученных с помощью CFD расчета и интегральным методом, при различных углах атаки α . Толщина потери импульса определялась на обеих сторонах профиля в районе его выходящей кромки. $Re=3.4 \cdot 10^5$.

1 – CFD расчет засасывающая поверхность, 2 – CFD расчет нагнетающая поверхность, 3 – расчет интегральным методом, засасывающая поверхность, 4 – расчет интегральным методом, нагнетающая поверхность.

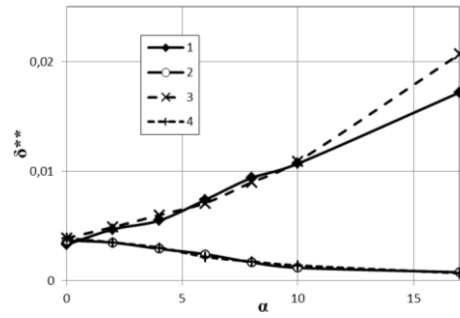


Рис. 10. Сопоставление расчетных величин толщин потери импульса, полученных с помощью CFD расчета и интегральным методом, при различных углах атаки α . Толщина потери импульса определялась на обеих сторонах профиля в районе его выходящей кромки. $Re=2.4 \cdot 10^6$. Обозначения как на рис. 9.

В целом можно констатировать хорошее согласование величин толщин потери импульса, определенных CFD расчетом и интегральным методом. Причем оценки для нагнетающей стороны профиля на всех углах атаки и на засасывающей стороне профиля при малых углах атаки показывают практически полное совпадение. По мере увеличения угла атаки результаты расчетов для засасывающей стороны начинают расходиться. Расхождение с одной стороны можно объяснить недостаточной точностью простой модели (интегрального метода). В то же время и CFD расчет при решении RANS-методом может давать неточные прогнозы отрывного обтекания. На этих режимах более уместно было бы использование LES или DES методов.

Положение точки отрыва пограничного слоя на профиле в CFD расчете может быть легко определено из критерия отрыва плоского пограничного слоя, заключающегося в равенстве нулю касательных напряжений на поверхности тела. На рис. 11 сопоставлено расположение точек отрыва пограничного слоя на засасывающей поверхности профиля, определенное двумя расчетными методами. Дополнительно, на рисунке 8, точки отрыва пограничного слоя указаны стрелками.

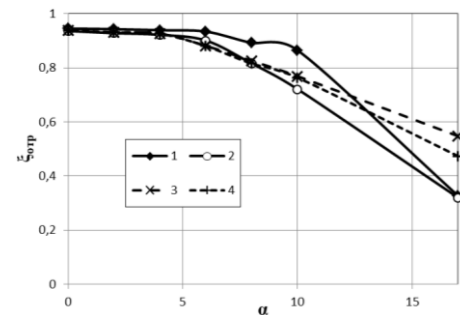


Рис. 11. Сопоставление расчетных положений точки отрыва пограничного слоя на засасывающей стороне профиля, полученных с помощью CFD расчета и интегральным методом, при различных углах атаки α . Координата ξ изменяется от 0 на входящей кромке до 1 на выходящей кромке профиля.

1 – CFD расчет $Re=2.4 \cdot 10^6$, 2 CFD расчет $Re=3.4 \cdot 10^5$, 3 – расчет интегральным методом, $Re=2.4 \cdot 10^6$, 4 – расчет интегральным методом, $Re=3.4 \cdot 10^5$.

Анализ представленных результатов показывает, что с одной стороны оба расчета демонстрируют общепризнанную тенденцию смещения точки отрыва в носик профиля по мере увеличения угла атаки. С другой стороны, имеется определенное расхождение между CFD расчетом и полуэмпирическим методом. В частности точка отрыва пограничного слоя, определяемая по методу интегральных соотношений практически не зависит от числа Рейнольдса, в то время как CFD расчет показывает заметное смещение этой точки в носик профиля при уменьшении числа Рейнольдса. Такой характер поведения в CFD расчете представляется более физичным.

Характер течения в пограничном слое не одинаков по его длине. В носике профиля пограничный слой практически всегда ламинарен, но по мере удаления от критической точки начинают формироваться предпосылки для перехода к турбулентному течению. При ламинарно-турбулентном переходе наблюдается резкий рост сопротивления трения [6]. Это позволило использовать для определения точки ламинарно-турбулентного перехода утилиту wallShearStress. С помощью этой утилиты были получены коэффициенты местного трения C_f , по которым и определялась точка перехода. Сопоставление расположения точек ламинарно-турбулентного перехода на профиле, определенное с помощью рассматриваемых расчетных методов, представлено на рис. 12. В целом можно говорить о хорошем согласовании места расположения точек ламинарно-турбулентного перехода, прогнозируемых используемыми расчетными методами.

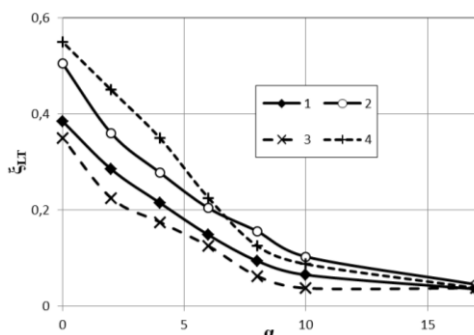


Рис. 12. Сопоставление расчетных положений точки ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое на засасывающей стороне профиля, полученных с помощью CFD расчета и интегральным методом, при различных углах атаки α . Координата ξ изменяется от 0 на входящей кромке до 1 на выходящей кромке профиля.

1 – CFD расчет $Re=2.4 \cdot 10^6$, 2 CFD расчет $Re=3.4 \cdot 10^5$,
3 – расчет интегральным методом, $Re=2.4 \cdot 10^6$, 4 –
расчет интегральным методом, $Re=3.4 \cdot 10^5$.

Заключение

Подводя итог, можно констатировать, что в рамках работы были решены следующие задачи:

- Разработана и отлажена схема расчета обтекания профиля крыла стационарным потоком несжимаемой жидкости на основе RANS метода в пакете openFOAM. В том числе были подтверждены сеточная сходимости расчета и достоверность получаемого решения, на основе сопоставления с экспериментальными данными.
- С помощью разработанной расчетной схемы проведены серии расчетов характеристик профиля крыла NACA 0018 при различных числах Рейнольдса и углах атаки. На основе этих расчетов были определены характеристики пограничного слоя на профиле.
- Выполнен анализ характеристик пограничного слоя и сопоставлены его характеристики, полученные с помощью CFD метода и полуэмпирического расчетного метода.

В результате, была подтверждена достоверность моделирования толщины потери импульса, положения точки ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое на профиле и момента наступления отрыва пограничного слоя, с помощью разработанного ранее расчетно-эмпирического метода. В тоже время, для окончательных выводов по моделированию отрыва пограничного слоя желательно провести исследования с использованием LES или DES методов.

Литература

1. Яковлев А. Ю., Тхант Зин, Расчетно-эмпирический метод оценки сопротивления гидродинамических профилей в широком диапазоне чисел Рейнольдса // Морские интеллектуальные технологии, 2(44), т. 1, 2019, с. 21 – 25.
2. Яковлев А. Ю., Тхант Зин, Полуэмпирический метод оценки характеристик гидродинамических профилей // Морские интеллектуальные технологии, 4(46), т. 1, 2019, с. 29 - 33.
3. Яковлев А. Ю., Тхант Зин, Метод пересчета результатов модельных испытаний гребного винта на натурные условия // Труды Крыловского ГИЦ, №399, 2022, с. 31 – 42. 10.24937/2542-2324-2022-1-399-31-42.

4. Елизаров А. М., Ильинский Н. Б., Поташев А. В. Обратные краевые задачи аэрогидродинамики. - М.: Наука. Издательская фирма "Физико-математическая литература", 1994.
5. Бойко А. В., Кириловский С. В., Маслов А. А., Поплавская Т. В. Инженерное моделирование ламинарно-турбулентного перехода: достижения и проблемы, Новосибирск, Институт теоретической и прикладной механики им С. А. Христиановича, 2015.
6. Вождаев В. В., Киселев А. Ф., Сбоев Д. С., Теперин Л. Л., Чернышев С. Л. Влияние модели турбулентности на точность определения положения ламинарно-турбулентного перехода. Техника воздушного флота, №4, 2012, с. 1-9.
7. Menter F., Langtry R., Likki S., Suzen Y., Huang P., Volker S. A correlation-based transition model using local variables – Part I: Model formulation, ASME J. Turbomach, 128, 2006. 10.1115/1.2184352
8. Али Рами, Тряскин Н.В. Влияние параметров турбулентности на характеристики переходного режима течения при обтекании профиля NACA0012, Морские интеллектуальные технологии, 3(45), т. 2, 2019, с. 39 – 44.
9. Амромин Э.Л., Васильев А.В. К расчетам потенциального обтекания плоского профиля вихревым методом // Вопросы судостроения, Серия Проектирование судов, вып. 23, 1980
10. Яковлев А.Ю., Тхант Зин Метод учета масштабного эффекта для гидродинамических профилей, Морские интеллектуальные технологии, 1(47), т. 3, 2020, с. 25 – 29.
11. OpenFOAM [Электронный ресурс] <https://www.openfoam.com/>
12. Kalitzin G., Medic G., Iaccarino G., Durbin P.. Near-wall behavior of RANS turbulence models and implications for wall functions. Computational physics, 204(205):265–291, 2004.
13. Москалев И. Об исследовании сходимости по сетке. Блог команды FlowVision URL: <https://flowvision.ru/ru/support-menu-header-ru/blog-ru/ob-issledovanii-skhodimosti-po-setke>
14. Jacobs E. N., Ward K. E, Pinkerton R. M. The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable-density wind tunnel, National advisory committee for aeronautics, Report No. 460, 1935.

References

1. Yakovlev A. Yu., Thant Zin Raschetno-empiricheskiy metod otsenki soprotivleniya gidrodinamicheskikh profiley v shirokom diapazone chisel Reynoldsa [Numerical-empirical evaluation method of hydrofoil sections drag in wide range of reynolds number], Marine intellectual technology, 2(44), vol.1, 2019, pp. 21 – 25.
2. Yakovlev A. Yu., Thant Zin Poluempiricheskiy metod otsenki harakteristik gidrodinamicheskikh profiley [Numerical-empirical evaluation method of hydrofoil sections characteristics], Marine intellectual technology, 4(46), vol.1, 2019, pp. 29 – 33.
3. Yakovlev A. Yu., Thant Zin Metod pereschjota rezultatov model'nih ispitaniy grebnogo vinta na naturnie uslovija [Method of recalculation from marine propeller model test results to full scale], KSRI transactions, vol. 399, 2022, pp. 31 – 42. 10.24937/2542-2324-2022-1-399-31-42.
4. Elizarov A.M., Ilyinskiy N.B., Potashev A.V. Obratniye kraevyye zadachi aerogidrodinamiki [Inverse boundary value problems of Aerohydrodynamics], Moscow, "Nauka", "Physic&Mathematic literature", 1994.
5. Bojko A., Kirillovsky S., Maslov A., Poplavskaja T. Ingenernoje modelirovanije laminarno-turbulentnogo perehoda: dostigenija I problem [Engineering modeling of laminar-turbulent transition: achievements and problems], Novosibirsk, Khristianovich ITAM SB RAS, 2015.
6. Vozdajev V., Kiselev A., Sboev D., Teperin L., Chernishov S. Vlijanie modeli turbulentnosti na tochnost opredelenija pologenija laminarno-turbulentnogo perehoda [Influence of the turbulence model on the accuracy of determining the position of the laminar-turbulent transition], Air Fleet equipment journal, No. 4, 2012, pp. 1 – 9.
7. Menter F., Langtry R., Likki S., Suzen Y., Huang P., Volker S. A correlation-based transition model using local variables – Part I: Model formulation, ASME J. Turbomach, 128, 2006. 10.1115/1.2184352
8. Ali Rami, Tryaskin N. Vlijanie parametrov turbulentnosti na haracteristici perehodnogo rezima techenija pri obtakaniji profilja NACA0012 [Effects of turbulence variables on transition flow characteristics over NACA0012 airfoil], Marine intellectual technology, 3(45), vol.2, 2019, pp. 39 – 44.
9. Amromin E.L., Vasilyev A.V. K raschetam potentsialnogo obtakanija ploskogo profilya vihrevim metodom [Calculations of the potential flow around the flat wing section by the vortex method], Shipbuilding questions, ser. Ship design, v. 23, 1980.
10. Yakovlev A. Yu., Thant Zin Metod uchjota mashtabnogo effecta dlja gidrodinamicheskikh profiley [Scale effect evaluation method of hydrofoil sections], Marine intellectual technology, 1(47), vol. 3, 2020, pp. 25 – 29.
11. OpenFOAM <https://www.openfoam.com/>
12. Kalitzin G., Medic G., Iaccarino G., Durbin P.. Near-wall behavior of RANS turbulence models and implications for wall functions. Computational physics, 204(205):265–291, 2004.
13. Moskaljov I. Ob issledovaniji shodimosty po setke [On the study of convergence on the grid.] FlowVision team blog URL: <https://flowvision.ru/ru/support-menu-header-ru/blog-ru/ob-issledovanii-skhodimosti-po-setke>
14. Jacobs E. N., Ward K. E, Pinkerton R. M. The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable-density wind tunnel, National advisory committee for aeronautics, Report No. 460, 1935.

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

Дмитрий Сергеевич Ромадин, бакалавр, студент магистратуры, кафедра гидроаэромеханики и морской акустики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская e-mail: kgm@smtu.ru

Dmitry S. Romadin, B. Sc., master's degree student, Hydrodynamic and marine acoustic department, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kgm@smtu.ru

Алексей Юрьевич Яковлев, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой гидроаэромеханики и морской акустики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kgm@smtu.ru

Aleksey Yu. Yakovlev, Dr. Sci. (Eng.), Assistant professor, Head of Hydrodynamic and marine acoustic department, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kgm@smtu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 13.08.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.12.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.12.2022.

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

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.007>

**Повышение долговечности прецизионных деталей судовых дизелей
формированием композиционных покрытий на поверхности плунжера**

Л.Б. Леонтьев¹, leontyev.l.b@yandex.ru, А.Л. Леонтьев², gfi25leontev@mail.ru,
К.А. Молоков^{3,4}, spektrum011277@gmail.com

¹Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, ²Правительство Приморского края,

³Дальневосточный федеральный университет (ДФУ);

⁴Владивостокский государственный университет (ВВГУ)

Аннотация. Основной причиной отказов плунжерных пар топливных насосов высокого давления (ТНВД) является потеря гидроплотности вследствие увеличения зазора между плунжером и втулкой из-за абразивного изнашивания сопряженных поверхностей трения, а также эрозионного и коррозионного изнашивания. Для восстановления изношенных и повышения долговечности плунжерных пар ТНВД необходимо разработать технологию формирования износостойких покрытий. Наиболее перспективным направлением восстановления и повышения износостойкости является формирование металлокерамических композиционных покрытий на основе гальванического хрома.

Основной целью работы является определение оптимальных механических свойств композиционного покрытия на основе гальванического хрома и состава органо-неорганического материала для его модифицирования, обеспечивающих максимальную износостойкость и долговечность прецизионных деталей топливной аппаратуры судовых дизелей. Проведенные исследования позволили установить, что формирование композиционного покрытия на основе гальванического хрома на плунжере позволяет повысить долговечность плунжерной пары по сравнению с хромированным плунжером более чем в три раза при использовании большинства органо-неорганических материалов.

Наиболее высокую износостойкость прецизионных деталей и соответственно их долговечность обеспечивает формирование покрытия на основе гальванического хрома с последующим его модифицированием вермикулитом, модифицированным хитозаном. Установлено, что наибольшее влияние на скорости изнашивания покрытия плунжера и стали ХВГ (втулка) оказывает коэффициент трения, меньшее – модуль упругости покрытия. Минимальное влияние оказывает величина упругого восстановления покрытия. Микротвердость покрытия практически не оказывает влияние на скорости изнашивания покрытия плунжера и стали ХВГ в данном диапазоне величин. Модифицирование гальванического хрома органо-неорганическими материалами позволяет существенно уменьшить коэффициент трения в плунжерной паре.

Высокое содержание углерода, кремния, алюминия и марганца в поверхностном слое свидетельствует об образовании износостойкого металлокерамического покрытия.

Ключевые слова: плунжерная пара, плунжер, покрытие, органо-минеральные материалы, формирование, механические характеристики, износостойкость, долговечность, наноиндентирование.

Для цитирования Леонтьев Л.Б., Леонтьев А.Л., Молоков К.А. Повышение долговечности прецизионных деталей судовых дизелей формированием композиционных покрытий на поверхности плунжера. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 73—80. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.007

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.007>

**Increasing the durability of precision parts of marine diesel engines by forming
composite coatings on the surface of the plunger**

Lev B. Leont'ev¹, Andrey L. Leont'ev², Konstantin A. Molokov^{3,4}

¹Marine State University named after adm. G.I. Nevelskoy, ²Primorsky Territory Government, ³Far Eastern Federal University (FEFU); ⁴Far Eastern State University, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The main reason for the failures of plunger pairs of high-pressure fuel pumps (injection pumps) is the loss of hydraulic density due to an increase in the gap between the plunger and the sleeve due to abrasive wear of the mating friction surfaces, as well as erosive and corrosive wear. To restore worn-out and increase the durability of plunger pairs of injection pumps, it is necessary to develop a technology for the formation of wear-resistant coatings. The most promising direction of restoration and improvement of wear resistance is the formation of metal-ceramic composite coatings based on galvanic chromium. The main purpose of the work is to determine the optimal mechanical properties

of a composite coating based on galvanic chromium and the composition of organo- inorganic material for its modification, ensuring maximum wear resistance and durability of precision parts of the fuel equipment of marine diesel engines.

The conducted studies have allowed us to establish that the formation of a composite coating based on electroplated chromium on the plunger makes it possible to increase the durability of the plunger pair in comparison with the chrome plunger by more than three times when using most organo-inorganic materials. The highest wear resistance of precision parts and, accordingly, their durability is ensured by the formation of a coating based on galvanic chromium, followed by its modification with vermiculite modified with chitosan. It is established that the coefficient of friction has the greatest influence on the wear rate of the coating of the plunger and the steel of the plunger bushing, the modulus of elasticity of the coating has the lesser. The amount of elastic recovery of the coating has a minimal effect. The microhardness of the coating has practically no effect on the wear rate of the coating of the plunger and plunger bushing in this range of values. Modification of electroplated chromium with organo-inorganic materials can significantly reduce the coefficient of friction in the plunger pair. The high content of carbon, silicon, aluminum and manganese in the surface layer indicates the formation of a wear-resistant metal-ceramic coating.

Keywords: plunger pair, plunger, coating, organomineral materials, formation, mechanical characteristics, wear resistance, durability, nanoindentation

For citation: Lev B. Leont'ev, Andrey L. Leont'ev, Konstantin A. Molokov. Increasing the durability of precision parts of marine diesel engines by forming composite coatings on the surface of the plunger. 2023. № 1 part 1, P. 73—80. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.007

Введение

Современные судовые дизеля характеризуются усложнением их конструкций, повышением удельной мощности и тепловых и механических напряжений, что приводит к уменьшению их долговечности. Прецизионные детали топливной аппаратуры являются одними из наиболее ответственных и наименее долговечных узлов топливной аппаратуры судовых дизелей. Экономичность и надежность судовых дизелей в значительной степени зависит от технического состояния топливной аппаратуры. При эксплуатации дизелей происходит износ прецизионных пар: «плунжер – втулка» топливного насоса и «игла – корпус распылителя» форсунки. Износ этих деталей приводит к увеличению зазоров в сопряжении, и как следствие — к увеличению протечек топлива и повышенному расходу топлива, а также к неравномерной подаче топлива по цилиндрам и, как следствие, нагрузки на основные детали цилиндра-поршневой группы распределяются неравномерно, происходит повышенный их износ, что приводит к снижению долговечности, мощности, а порой и к аварии дизеля [1].

Основной причиной отказов плунжерных пар топливных насосов высокого давления (ТНВД) является потеря гидроплотности вследствие увеличения зазора между плунжером и втулкой из-за абразивного изнашивания сопряженных поверхностей трения, а также эрозионного и коррозионного изнашивания [1, 2].

Обеспечение эффективной работы ремонтных предприятий в условиях рыночной экономики, повышение уровня их производства зависит от сохранения конкурентных характеристик, поэтому наблюдается постоянное совершенствование технологии ремонта плунжерных пар ТНВД судовых двигателей. Наиболее широкое применение для восстановления плунжерных, обеспечивающих также повышение их ресурса, является электролитическое пористое хромирование [1, 3], реже применяются диффузионное хромирование [2] и диффузионная металлизация [4]. Эксплуатация прецизионных деталей, восстановленных нанесением гальванического хрома, показала их довольно высокую надежность [1]. Для

восстановления и упрочнения прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей также используют серпентинит, в этом случае снижаются коэффициент трения, параметры шероховатости поверхности и повышаются противозадирные свойства пары трения [5].

Необходимо также учитывать, что в настоящее время доля стоимости иностранных комплектующих в структуре стоимости судового оборудования составляет для гражданского сектора от 40 до 85 % [6], а большинство судовых дизелей иностранной постройки.

Для повышения долговечности трибосопряжений, работающих в условиях абразивного изнашивания, многие авторы рекомендуют повышать твердость поверхностных слоев деталей. В работе М.М. Хрущева и М.А. Бабичева [7] показано, что твердость материалов, зависящая от энергии связей в кристаллической решетке, в значительной мере определяет сопротивление материалов абразивному изнашиванию (при твердости абразива, намного превышающей твердость изнашиваемого материала). Если же твердость материала близка к твердости абразивных частиц или тем более превышает ее, износостойкость возрастает. Как правило, способность к схватыванию и масштаб вызываемых им повреждений также снижаются с увеличением твердости [8]. Таким образом, повышение твердости приводит к повышению сопротивления при абразивном изнашивании и противозадирных характеристик сопряжения [9].

Износостойкость трибосопряжения определяется как физическими параметрами процесса, так и в значительной степени механическими свойствами поверхностного слоя поверхности трения. Так как на физические параметры процесса изнашивания нет возможности оказывать существенное влияние, управлять этим процессом можно путем получения оптимальных параметров механических и триботехнических свойств износостойких покрытий. Для этого необходимо получить количественные или качественные зависимости износостойкости материалов покрытий от их эксплуатационных свойств.

Для повышения долговечности плунжерных пар ТНВД необходимо определить оптимальный диапазон механических и триботехнических

характеристик износостойких покрытий и разработать технологию их формирования. Наиболее перспективным направлением повышения износостойкости является формирование металлокерамических композиционных покрытий.

В настоящее время для повышения износостойкости деталей трибоузлов применяют модифицирование поверхностей трения органо-минеральными материалами с целью уменьшения коэффициента трения и увеличения поверхностной твердости, которые способны формировать защитные металлокерамические пленки толщиной 2–5 мкм, содержащие в большом количестве Si, Al, O, C в алмазоподобной фазе [1, 5, 10, 11].

Для восстановления и упрочнения прецизионных деталей судовых дизелей вследствие значительного износа в районе нагнетательной кромки плунжера и местных износов в районах наполнительного и отсечного отверстий втулки (зазор в верхней части плунжерной пары находится в пределах 25–40 мкм, но может достигать 260 мкм) используют пористое хромирование. Однако износостойкость хрома недостаточна для обеспечения заданного ресурса деталей. Для увеличения ресурса перспективно применение композиционных покрытий хром + металлокерамика, которые позволяют снизить коэффициент трения и повысить износостойкость трибосопряжения [1]. При этом толщина слоя в композиционном покрытии может составлять несколько микрометров. В этом случае наиболее точным методом оценки механических свойств является наноиндентирование [12, 13].

Цель работы – определение оптимальных механических свойств композиционного покрытия на основе гальванического хрома и состава органо-неорганического материала для его модифицирования, обеспечивающих максимальную износостойкость и долговечность прецизионных деталей топливной аппаратуры судовых дизелей.

1. Материалы и методы исследования

Формирование покрытий на образцах из стали ХВГ проводили в следующей последовательности: сначала наносили хром толщиной 15–20 мкм гальваническим методом на режимах, обеспечивающих получение пористого покрытия, затем модифицировали органо-неорганическими материалами: серпентинитом; вермикулитом, композициями и композитами на их основе фрикционно-механическим способом [1].

Серпентинит, который применялся для исследований, имел брутто-формулу: $4.5\text{MgO} \cdot 0.7\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 0.3\text{CaO} \cdot 0.2\text{MnO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

Состав вермикулита имел брутто-формулу: $\text{Mg} \cdot \text{Fe}_{0.8} \cdot \text{Al}_{0.4} \cdot \text{Si}_{2.1}\text{O}_9 \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot (\text{CaSiO}_3)_{0.9}$.

Хитозан представляет собой природный полисахарид, содержащий 41,8 % углерода, 7,5 % азота и 8,8 % воды. Брутто-формула хитозана $(\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_4\text{NH}_2)_n$.

Исследования триботехнических свойств покрытий проводили на универсальной машине трения модели УМТВК по схеме «ролик–ролик» при постоянной скорости скольжения 0,71 м/с. Для триботехнических испытаний образцы изготавливали из стали ХВГ в форме роликов диаметром 45 мм, шириной 10 мм. Перед проведением испытаний

образцы полировали алмазной пастой до $Ra \leq 0,063$ мкм. В качестве неподвижного образца использовался ролик из стали ХВГ твердостью 60–61 HRC. Время испытаний каждой пары трения составляло четыре часа. Нагрузка изменялась от 100 до 500 Н. Испытания проводили с искусственным загрязнителем в смазке. В качестве искусственного загрязнителя использовалась кварцевая пыль дисперсностью 1–5 мкм. Концентрация загрязнителя в топливе составляла 1%. Смазку пары трения осуществляли капельным способом (50–55 капель в минуту). Для смазки применялось дизельное топливо марки Л-0,5 по ГОСТ 305-2013.

Для исследования механических свойств покрытий на наноуровне использовали ультрамикротестер для динамических испытаний твердости материалов DUN-211S фирмы Shimadzu (Япония). Прибор предназначен для измерения твердости, модуля упругости и упругого восстановления по методу наноиндентирования. Испытания соответствуют стандарту ISO 14577-4:2016. Испытания проводили на режиме, обеспечивающем примерно постоянную глубину остаточного отпечатка при максимальной нагрузке на индентор, при этом величина нагрузки несколько отличалась по величине. Величину упругого восстановления покрытий определяли по формуле [12, 13]:

$$W_e = \frac{(h_{\max} - h_r)}{h_{\max}}$$

где h_r – глубина остаточного отпечатка после снятия нагрузки; h_{\max} – максимальная глубина отпечатка при максимальной нагрузке P_{\max} .

2. Результаты исследования их обсуждение

Исследования механических свойств стали ХВГ и покрытий методом наноиндентирования позволили установить следующее.

Величины микротвердости и модуля упругости стали и покрытий зависят от максимальной глубины отпечатка, причем увеличение глубины до 1,5 мкм и более приводит к существенному уменьшению величин микротвердости и модуля упругости (табл. 1). Поэтому для анализа влияния параметров механических свойств на триботехнические свойства была выбрана глубина $\leq 0,9$ мкм, обеспечивающая определение свойств поверхностных слоев, непосредственно влияющих на процесс трения и изнашивания.

Модуль упругости стали ХВГ не изменяется в процессе трения. Микротвердость поверхностного слоя в процессе триботехнических испытаний возрастает: при трении в паре с гальваническим хромом с 637 HV до 709 HV (на 11,3 %), а при трении с хромом, модифицированным органо-неорганическими материалами, увеличивается до 828 HV (на 16,8 % по сравнению с исходной микротвердостью). Модифицирование хрома органо-неорганическими материалами проводили после его нанесения на сталь на оптимальном режиме (плотность тока 60 А, температура электролита 50 °С).

Механические свойства гальванического хрома существенно зависят от параметров процесса его нанесения (табл. 1).

Таблица 1

Механические свойства стали ХВГ и износостойких покрытий

Состав покрытия	Нагрузка на индентор P_{max} , мН	Глубина остаточного отпечатка при максимальной нагрузке на индентор h_p , мкм	Модуль упругости покрытия $E \times 10^5$, МПа	Микротвердость, HV	Величина упругого восстановления покрытия W_e
Сталь ХВГ после шлифования	<u>166–172</u> 169	<u>0,920–0,934</u> 0,927	<u>2,01–2,08</u> 2,05	<u>613–655</u> 637	0,216
	<u>587–597</u> 594	<u>1,678–1,724</u> 1,696	<u>1,71–1,74</u> 1,72	<u>595–623</u> 609	0,270
Сталь ХВГ после испытаний в паре трения с гальваническим хромом	<u>176–197</u> 185	<u>0,892–0,909</u> 0,903	<u>2,00–2,09</u> 2,05	<u>693–726</u> 709	0,227
	<u>567–620</u> 594	<u>1,659–1,692</u> 1,676	<u>1,75–1,86</u> 1,80	<u>676–693</u> 684	0,284
Сталь ХВГ после испытаний в паре трения с хромом, упрочненным композицией 90% серпентинита + 10% вермикулита	<u>196–208</u> 202	<u>0,858–0,866</u> 0,862	<u>1,99–2,01</u> 2,00	<u>804–850</u> 828	0,275
Хром (режим хромирования: плотность тока 60 А, температура электролита 50 °С – оптимальный режим)	<u>249–294</u> 246	<u>0,762–0,782</u> 0,770	<u>2,23–2,54</u> 2,40	<u>982–1080</u> 1043	0,387
	<u>734–853</u> 798	<u>1,476–1,529</u> 1,497	<u>1,69–1,87</u> 1,77	<u>855–1069</u> 965	0,430
	<u>1285–1444</u> 1368	<u>2,298–2,331</u> 2,309	<u>1,38–1,50</u> 1,43	<u>816–866</u> 837	0,350
Хром (режим хромирования плотность тока 60 А, температура электролита 58 °С)	<u>306–352</u> 329	<u>0,722–0,752</u> 0,737	<u>2,45–2,72</u> 2,56	<u>970–1018</u> 994	0,419
Хром + серпентинит	<u>241–280</u> 260	<u>0,783–0,816</u> 0,800	<u>2,14–2,51</u> 2,33	<u>1118–1213</u> 1166	0,386
Хром + композит серпентинит + хитозан	<u>204–253</u> 229	<u>0,744–0,785</u> 0,767	<u>1,68–1,98</u> 1,82	<u>1091–1106</u> 1098	0,419
Хром + вермикулит	<u>249–271</u> 260	<u>0,794–0,799</u> 0,797	<u>2,17–2,46</u> 2,32	<u>1065–1116</u> 1087	0,403
Хром + вермикулит, модифицированный HCl	<u>243–266</u> 257	<u>0,777–0,796</u> 0,786	<u>2,06–2,18</u> 2,12	<u>1006–1074</u> 1042	0,450
Хром + композит вермикулит + хитозан	<u>237–264</u> 250	<u>0,782–0,795</u> 0,789	<u>1,86–2,06</u> 1,95	<u>995–1069</u> 1032	0,409
Хром + композиция 90% серпентинита + 10% вермикулита	<u>250–260</u> 256	<u>0,782–0,805</u> 0,794	<u>2,05–2,42</u> 2,26	<u>1085–1167</u> 1137	0,356
	<u>733–820</u> 775	<u>1,507–1,549</u> 1,525	<u>1,69–1,83</u> 1,75	<u>942–1030</u> 998	0,370
	<u>1281–1390</u> 1338	<u>2,338–2,421</u> 2,382	<u>1,43–1,48</u> 1,46	<u>798–852</u> 823	0,341
Хром + композиция 80% серпентинита + 20% вермикулита (61)	<u>227–260</u> 243	<u>0,797–0,836</u> 0,816	<u>2,15–2,33</u> 2,22	<u>999–1126</u> 1057	0,335
Хром + композиция 90% серпентинита + композит (10% вермикулита + хитозан)	<u>238–255</u> 248	<u>0,768–0,791</u> 0,783	<u>2,03–2,16</u> 2,11	<u>1034–1101</u> 1067	0,423
	<u>574–594</u> 584	<u>1,537–1,557</u> 1,547	<u>1,22–1,32</u> 1,27	<u>938–990</u> 964	0,402
Примечание. В числителе приведен диапазон изменения величины параметра, в знаменателе – среднее значение семи измерений.					

Модифицирование хрома органо-неорганическими материалами проводили после его нанесения на сталь на оптимальном режиме и позволяет уменьшить модуль упругости и увеличить

микротвердость покрытия. Наибольшая величина твердости покрытия характерна для хрома, упрочненного серпентинитом (1166 HV) и композицией 90% серпентинита + 10% вермикулита

(1137 HV), наименьшая — при упрочнении хрома вермикулитом, модифицированным хитозаном (1032 HV).

Модифицирование органо-неорганических материалов хитозаном приводит к незначительному уменьшению микротвердости и существенному снижению модуля упругости покрытия (табл. 1).

Сталь ХВГ характеризуется низкой величиной упругого восстановления покрытия.

Величина упругого восстановления гальванического хрома зависит от параметров процесса его нанесения (табл. 1). Модифицирование хромового покрытия органо-неорганическими

материалами влияет на величину упругого восстановления.

Наибольшее влияние модифицирование хромового покрытия органо-неорганическими материалами оказывает на уменьшение величин коэффициента трения и скоростей изнашивания плунжера и втулки. Формирование композитного покрытия на основе гальванического хрома позволяет повысить долговечность плунжерной пары по сравнению с хромированным плунжером более чем в три раза при использовании большинства органо-неорганических материалов (табл. 2).

Таблица 2

Механические и триботехнические свойства износостойких покрытий

Триботехнический материал для модифицирования гальванического хрома	Модуль упругости покрытия $E \times 10^5$, МПа	Микротвердость H, HV	Величина упругого восстановления покрытия W_n	Коэффициент трения, k_t	Скорость изнашивания покрытия плунжера мг/ч	Скорость изнашивания втулки, мг/ч	Суммарная скорость изнашивания пары трения, мм/ч
Сталь ХВГ	2,05	637	0,216	-	-	-	-
Хром (оптимальный режим хромирования: плотность тока 60 А, температура электролита 50 °С)	2,40	1043	0,387	0,209	1,8	7,2	9,0
Хром (режим хромирования: плотность тока 60 А, температура электролита 58 °С)	2,56	994	0,419	0,205	2,0	7,9	10,0
Серпентинит	2,33	1166	0,386	0,125	0,9	1,9	2,8
Серпентинит, модифицированный хитозаном	1,82	1098	0,389	0,142	0,5	1,8	2,3
Вермикулит	2,32	1087	0,403	0,166	1,4	3,2	4,6
Вермикулит, модифицированный соляной кислотой	2,12	1042	0,450	0,130	0,4	2,4	2,8
Вермикулит, модифицированный хитозаном	1,95	1032	0,409	0,128	0,2	2,3	2,5
Композиция 90% серпентинита + 10% вермикулита	2,26	1137	0,356	0,135	0,6	2,1	2,7
Композиция 80% серпентинита + 20% вермикулита	2,22	1057	0,355	0,134	0,5	2,5	3,0
Композиция 90% серпентинита + 10% вермикулита, модифицированного хитозаном	2,11	1067	0,423	0,122	0,3	2,0	2,3

Для оценки влияния механических свойств покрытия и коэффициента трения на износостойкость трибосоприжения «плунжер – втулка» ТНВД необходимо получить математические зависимости. Обработка результатов исследования (табл. 2) позволила установить зависимости скорости изнашивания сопряженных поверхностей от механических свойств покрытия и коэффициента трения:

– покрытия плунжера ($R^2 = 0,88$):
 $V_n = -2,596 + 0,742 \times 10^{-5} E - 1,51 W_e + 16,86 k_t$;
 – втулки плунжерной пары ($R^2 = 0,87$):
 $V_c = 0,465 + 3,04 \times 10^{-5} E - 9,8 \times 10^{-3} HV + 1,12 W_e + 42,015 k_t$.

Достаточно высокий коэффициент корреляции позволяет анализировать влияние исследуемых параметров на скорости изнашивания покрытия плунжера и сопряженной стали ХВГ, но указывает на то, что имеются еще факторы, влияющие на процесс изнашивания (например, топография поверхности трения, химический состав и структура покрытия и др.) однако их влиянием можно пренебречь ввиду незначительного влияния или косвенного влияния на коэффициент трения.

Анализ зависимостей и рис. 1, а и б позволил установить, что наибольшее влияние на скорости изнашивания покрытия плунжера и стали ХВГ (втулка) оказывают коэффициент трения, меньшее –

модуль упругости покрытия, меньшее влияние оказывает величина упругого восстановления покрытия. Микротвердость покрытия практически не оказывает влияния на скорость изнашивания плунжера и незначительно снижает скорость изнашивания стали ХВГ в данном диапазоне величин.

Наиболее высокую износостойкость прецизионных деталей и соответственно их долговечность обеспечивает формирование покрытия на основе гальванического хрома с последующим его модифицированием вермикулитом, модифицированным хитозаном.

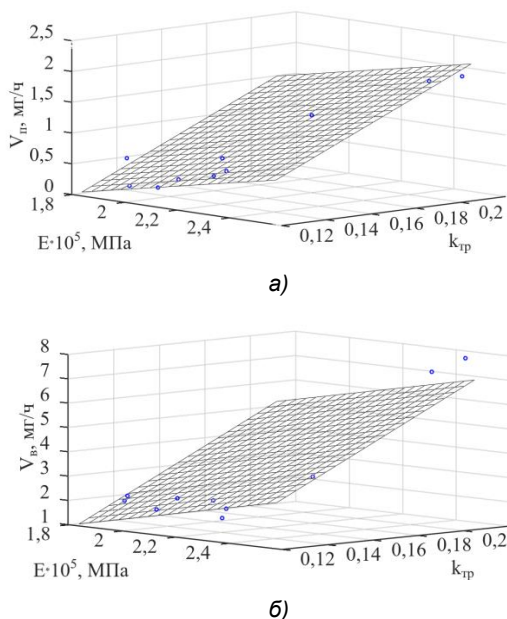


Рис. 1. Влияние модуля упругости покрытия плунжера и коэффициента трения на скорости изнашивания плунжера (а) и втулки (б)

Таким образом, для обеспечения максимальной долговечности плунжерных пар необходимо на поверхности плунжера формировать композиционное покрытие на основе хрома с последующей его модификацией органо-неорганическими материалами модифицированными хитозаном, который обеспечивает получение минимальных величин коэффициента трения и модуля упругости покрытия.

Для анализа влияния модифицирования хрома органо-неорганическими материалами на структуру покрытия были проведены металлографические исследования позволившие установить, что осадки хрома характеризуются наличием на поверхности сетки микротрещин и пор, которые соединяются между собой, образуя дорожки (рис. 2а). Модифицирование поверхности хромовых осадков органо-неорганическими материалами приводит к образованию композиционного покрытия, которое заполняет поры и впадины между вершинами кристаллитов хрома. При этом дефекты на поверхности хрома в виде пор и микротрещин «залечиваются», вследствие этого линия от наружной поверхности на микрошлифе становится четкой и ровной (рис. 2, б).

Исследование композиционных покрытий с помощью рентгено-электронной спектроскопии позволило установить состав металлокерамической

пленки на глубине до 100 нм. В зависимости от применяемого материала для модифицирования хромового покрытия поверхностный слой имеет следующий состав (в атомных процентах):

– при упрочнении хрома вермикулитом, модифицированным хитозаном: C = 29.91, O = 21.64, Al = 16.39, Cr = 20.20, Si = 8.61, Na = 0.87, Fe = 2.38;

– при упрочнении хрома серпентинитом: C = 47.60, O = 22.93, Cr = 18.35, Na = 2.31, Si = 3.47, Mn = 1.95, Fe = 1.85, Al = 1.54;

– при упрочнении хрома композицией 90% серпентинита + 10% хитозана: C = 57.12, O = 22.03, Al = 9.04, Cr = 3.85, Si = 3.27, Ca = 2.31, Fe = 1.85;

– при упрочнении хрома композицией 90% серпентинита + 10% вермикулита, модифицированного хитозаном: C = 56.23, O = 21.83, Cr = 10.89, Si = 3.78, Al = 4.93, Na = 1.78, Mn = 0.33, Fe = 0.23;

– при упрочнении хрома серпентинитом, модифицированным хитозаном: C = 58.20, Cr = 10.85, O = 21.83, Si = 3.72, Na = 1.78, Al = 1.37, Fe = 1.15, Mn = 1.10.

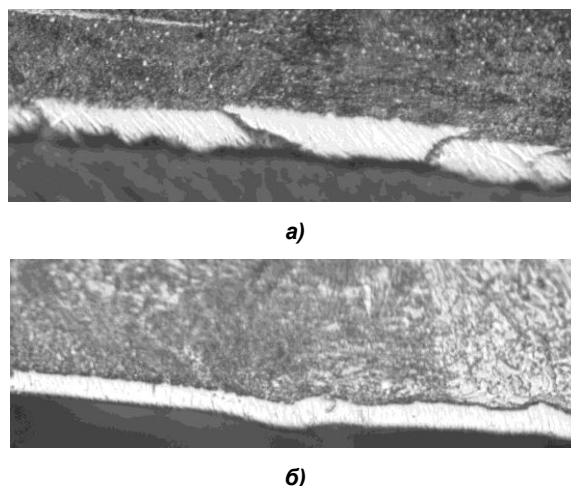


Рис. 2. Микроструктура износостойких покрытий: а – гальванического хрома толщиной 15 мкм (х500); б – гальванического хрома толщиной 15 мкм, упрочненного композицией 90% серпентинита + 10% вермикулита, модифицированного хитозаном (х500)

Исследование композиционных покрытий с помощью рентгено-флуоресценции на глубине свыше 100 нм после упрочнения хрома композициями на основе серпентинита позволило установить состав (средняя величина в атомных процентах): Cr = 98.10, Mn = 1.12, Si = 0.61, Fe = 0.17.

Высокое содержание углерода, кремния, алюминия и марганца в поверхностном слое свидетельствует об образовании износостойкого металлокерамического покрытия.

Заключение

Проведенные исследования позволили установить.

1. Формирование композиционного металлокерамического покрытия на основе гальванического хрома на плунжере позволяет повысить долговечность плунжерной пары по сравнению с хромированным плунжером более чем в три раза при использовании большинства органо-неорганических материалов.

2. Наиболее высокую износостойкость прецизионных деталей и соответственно их долговечность обеспечивает формирование покрытия на основе гальванического хрома с последующим его модифицированием вермикулитом, модифицированным хитозаном.

3. Установлено, что наибольшее влияние на скорости изнашивания покрытия плунжера и стали ХВГ (втулка) оказывает коэффициент трения, меньшее – модуль упругости покрытия. Минимальное влияние оказывает величина упругого восстановления покрытия. Микротвердость покрытия

практически не оказывает влияние на скорости изнашивания покрытия плунжера и стали ХВГ в данном диапазоне величин.

4. Модифицирование гальванического хрома органическими материалами позволяет существенно уменьшить коэффициент трения в плунжерной паре.

5. Высокое содержание углерода, кремния, алюминия и марганца в поверхностном слое свидетельствует об образовании износостойкого металлокерамического покрытия.

Литература

1. Леонтьев, Л.Б., Леонтьев А.Л., Шапкин Н.П. Разработка композиционных износостойких покрытий для пар трения «плунжер – втулка» топливных насосов высокого давления дизелей [Электронный ресурс]: монография // Владивосток: Издательский дом ДВФУ, 2012. – 103 с.
2. Кодинцев Н.П., Сидоров В.Н., Шаповалов А.П. Восстановление и упрочнение плунжерных пар топливных насосов высокого давления // Международный журнал перспективных исследований, Т. 8, №4, 2018. С. 99–111. DOI: 10.12731/2227-930X-2018-4-99-111
3. Дондиков Ю.Ж., Лысанова Н.В. Интенсификация восстановления плунжерных пар электролитическим хромированием // Сборник научно-исследовательских работ по итогам научно-практической конференции: «Ларионовские чтения – 2022» Якутск, 18 февраля 2022 г. С. 134–140.
4. Huseynov A.G., Gouishov R. Theoretical substantiation of recovery of high pressure fuel pumps of marine engines (hppu) by diffusion metallization of plug pairs // Universum: Технические науки. №4 (97). 2022. С. 56–59. DOI: 10.32743/UniTech.2022.97.4.13453
5. Шарифулин С.Н. Пути повышения эффективности работы топливной аппаратуры автотракторных дизельных двигателей / С. Н. Шарифулин, Н. Р. Агидамов. – Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2008. – 296 с.
6. Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 октября 2019 г. № 2553-р.
7. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 252 с.
8. Тушинский Л.И., Плохов А.В. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий. – Новосибирск: Наука, 1986. – 200 с.
9. Newby K., Jones A.R. Hardness and wear characteristics for a new non-fluoride high efficiency chromium plating chemistry // SAE Techn. Pap. Ser. –1989 – № 890914. С. 1–7. DOI:10.4271/890914
10. Дунаев А.В., Ладиков В.В., Пустовой И.Ф., Голубев И.Г. Эффективность применения минеральных модификаторов при техническом сервисе в АПК: науч. издание – М.: ФГБНУ «Росинформротех», 2014. – 164 с.
11. Колокатов А.М. Ремонтно-восстановительные составы для повышения ресурса машин. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. – 215 с.
12. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности. – М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.
13. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства материалов в субмикро- и наномасштабе. Недавние результаты и достижения (Обзор) / Физика твердого тела, 2021, том 63, вып. 1. С. 3–42. DOI: 10.21883/FTT.2021.01.50395.171

References

1. Leontiev, L.B., Leontiev A.L., Shapkin N.P. Development of composite wear-resistant coatings for friction pairs "plunger-sleeve" of diesel high-pressure fuel pumps [Electronic resource]: monograph // Vladivostok: FEPU Publishing House, 2012. - 103 p.
2. Kodintsev N.P., Sidorov V.N., Shapovalov A.P. Restoration and hardening of plunger pairs of high pressure fuel pumps // International Journal of Advanced Research, Vol. 8, No. 4, 2018. P. 99–111. DOI: 10.12731/2227-930X-2018-4-99-111
3. Dondikov Yu.Zh., Lysanova N.V. Intensification of the recovery of plunger pairs by electrolytic chromium plating // Collection of research papers based on the results of the scientific and practical conference: "Larionov Readings - 2022" Yakutsk, February 18, 2022, pp. 134–140.
4. Huseynov A.G., Gouishov R. Theoretical substantiation of recovery of high pressure fuel pumps of marine engines (hppu) by diffusion metallization of plug pairs // Universum: Technical sciences. No. 4 (97). 2022, pp. 56–59. DOI: 10.32743/UniTech.2022.97.4.13453
5. Sharifulin S.N., Sharifulin S. N., Agidamov N. R. Ways to improve the efficiency of the fuel equipment of autotractor diesel engines. - Kazan: Kazan Publishing House. state un-ta, 2008. - 296 p.
6. Strategy for the development of the shipbuilding industry for the period up to 2035. Approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated October 28, 2019 No. 2553-r.
7. Khrushchev M.M., Babichev M.A. abrasive wear. M.: Nauka, 1970. 252 p.
8. Tushinsky L.I., Plokhov A.V. Study of the structure and physical and mechanical properties of coatings. - Novosibirsk: Nauka, 1986. - 200 p.
9. Newby K., Jones A.R. Hardness and wear characteristics for a new non-fluoride high efficiency chromium plating chemistry // SAE Techn. Pap. Ser. -1989 - No. 890914. S. 1-7. DOI:10.4271/890914

10. Dunaev A.V., Ladikov V.V., Pustovoi I.F., Golubev I.G. The effectiveness of the use of mineral modifiers in technical service in the agro-industrial complex: scientific. edition - M.: FGBNU "Rosinformagrotech", 2014. - 164 p.
11. Kolokatov A.M. Repair and restoration compositions for increasing the service life of machines. Moscow: RGAU-MSHA Publ., 2016. – 215 p.
12. Golovin Yu. I. Nanoindentation and its possibilities. - M.: Mashinostroenie, 2009. - 312 p.
13. Golovin Yu.I. Nanoindentation and mechanical properties of materials in submicro- and nanoscale. Recent results and achievements (Review) / Solid State Physics, 2021, vol. 63, no. 1. S. 3–42. DOI: 10.21883/FTT.2021.01.50395.171

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

Лев Борисович Леонтьев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии и организации судоремонта, Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: leontyev.l.b@yandex.ru

Андрей Львович Леонтьев, кандидат технических наук, министр энергетики и газоснабжения, Правительство Приморского края, 690110, Владивосток, ул. Светланская, 22, e-mail: gfi25leontev@mail.ru

Константин Александрович Молоков, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сварочного производства, Дальневосточный федеральный университет, 690950, Владивосток, ул. Суханова, 8; доцент кафедры информационных технологий и систем, Владивостокский государственный университет, 690014, Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: spektrum011277@gmail.com

Lev B. Leont'ev, Dr. Sci. (Eng), Prof., Professor of the Department of Technology and Organization of Ship Repair, Marine State University named after Adm. G.I. Nevelsky, 690003, Vladivostok, Verkhneportovaya str., 50a, Russian Federation, e-mail: leontyev.l.b@yandex.ru

Andrey L. Leont'ev, Ph.D. (Eng), Minister of Energy and Gas Supply, Primorsky Krai Government, 22 Svetlanskaya Str., Vladivostok, 690110, Russian Federation, e-mail: gfi25leontev@mail.ru

Konstantin A. Molokov, Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the Department of Welding Engineering, Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, st. Sukhanov, 8; assistant professor of the Department of Information Technologies and Systems, Vladivostok State University, 690014, Vladivostok, Gogolya st., 41, Russian Federation, e-mail: spektrum011277@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.11.2022.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.01.2023.
Принята к публикации/accepted for publication 24.01.2023

Научная статья

УДК 621.923

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.008>

Реакция на произвольный сигнал динамической системы виброизолирующего устройства станка в условиях плавучей мастерской

А.Л. Боран-Кешишьян¹ bk.anastas@gmail.com, С.М. Братан² serg.bratan@gmail.com,

А.О. Харченко² khao@list.ru, Е.А. Владецкая² vladetska@rambler.ru

¹Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова,

²Севастопольский государственный университет

Аннотация. В статье приведены результаты анализа и теоретических исследований реакции динамической системы на внешние воздействия в условиях плавучей мастерской. Для обеспечения качества поверхностей при шлифовании разработана процедура вычисления реакции линейной системы с сосредоточенными параметрами на сигнал произвольной формы (без преобразования входного сигнала). На основании предложенной методики представлена процедура преобразования дифференциального уравнения системы виброизолирующего устройства станка, сведения его к операторной форме и разделения переменных, получения операторной передаточной функции, по которой для сравнения можно вычислить реакцию на стандартный сигнал. Одно из полученных решений, либо их комбинация могут быть применены для вычисления реакции системы на произвольный дискретно заданный входной сигнал. Рассмотрен пример моделирования технологической системы круглошлифовального станка, оснащенной виброизолирующим устройством. Приведены графики реакции системы при изменениях параметров, графики переходных характеристик и погрешностей. Погрешность полученного численного решения зависит от величины шага квантования. Введенный коэффициент демпфирования позволяет оценить качество работы виброизолирующей опоры и эффект от ввода коррекции её параметров. Для реализации метода целесообразно предложить ряд конструктивных решений по обеспечению эффективного управления демпфированием виброизолирующей опоры металлорежущего станка при внешних воздействиях, что позволит существенно повысить качество изготовления деталей в условиях плавучей мастерской.

Ключевые слова: плавучая мастерская, круглошлифовальный станок, динамическая система, вибрационные воздействия, график реакции системы, график переходных характеристик, моделирование технологической системы.

Для цитирования: Боран-Кешишьян А.Л., Братан С.М., Харченко А.О., Владецкая Е.А. Реакция на произвольный сигнал динамической системы виброизолирующего устройства станка в условиях плавучей мастерской, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 81—85. DOI: [10.37220/MIT.2023.59.1.008](https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.008)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.008>

Reaction to an arbitrary signal of the dynamic system of the vibration isolation device of the machine in a floating workshop

Anastas L. Boran-Keshishyan¹, Sergey M. Bratan² serg.bratan@gmail.com,

Alexander O. Kharchenko² khao@list.ru, Ekaterina A. Vladetskaya² vladetska@rambler.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University, ²Sevastopol State University

Abstract. The article presents the results of analysis and theoretical studies of the reaction of a dynamic system to external influences in a floating workshop. To ensure the quality of surfaces during grinding, a procedure has been developed for calculating the response of a linear system with lumped parameters to an arbitrary waveform (without converting the input signal). On the basis of the proposed technique, a procedure is presented for transforming the differential equation of the vibration isolation system of a machine tool, reducing it to an operator form and separating variables, obtaining an operator transfer function, which can be used to calculate the response to a standard signal for comparison. One of the solutions obtained, or a combination of them, can be used to calculate the system's response to an arbitrary discretely given input signal. An example of modeling the technological system of a circular grinding machine equipped with a vibration isolation device is considered. The graphs of the system's response to changes in parameters, graphs of transient characteristics and errors are presented. The error of the obtained numerical solution depends on the size of the quantization step. The introduced damping coefficient makes it possible to evaluate the quality of the vibration-isolating support and the effect of entering the correction of its parameters. To implement the method, it is advisable to propose a number of design solutions to ensure effective damping control of the vibration-insulating support of a metal-cutting machine under external influences, which will significantly improve the quality of parts manufacturing in a floating workshop.

Keywords: floating workshop, cylindrical grinding machine, dynamic system, vibration effects, system response graph, transient response graph, process system simulation.

For citation: Anastas L. Boran-Keshishyan, Sergey M. Bratan, Alexander O. Kharchenko, Ekaterina A. Vladetskaya. Reaction to an arbitrary signal of the dynamic system of the vibration isolation device of the machine in a floating workshop, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 81—85. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.008

Введение

Анализ реакции динамических систем на сигнал произвольной формы представляет собой задачу, решение которой возможно путем разложения сигнала и представления его в полигармонической форме. При этом возникает проблема определения требуемого числа гармонических составляющих и вычисления значений их амплитуд, что осложняет решение задачи и приводит к появлению погрешности. Возможен рекуррентный метод [1] анализа реакции динамической системы по ее операторной передаточной функции, исключающий процедуру преобразования сигнала.

Вопросам исследования реакции динамической системы на внешние воздействия посвящено большое количество работ, накоплен справочный материал, в частности по защите технических объектов от вибраций и ударов [2]. Разработан математический аппарат для автоматического управления различными техническими и технологическими объектами и системами, позволяющий использовать численные методы анализа и синтеза систем и объектов в конкретных примерах [3]. Однако возникающие новые задачи, связанные с виброустойчивостью таких технических объектов, как станки, работающие в условиях плавучей мастерской, требуют новых подходов к моделированию реакций их динамических систем на сигналы произвольной формы [4].

Цель работы состоит в разработке численной процедуры вычисления реакции линейной системы с сосредоточенными параметрами на сигнал произвольной формы без преобразования входного сигнала.

Численная процедура вычисления реакции линейной системы на произвольный сигнал

Рассмотрим процедуру получения решения в обобщенной форме. Для входного сигнала X звена с операторной передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{C(p)}{Z(p)},$$

где $C(p) = b_0 + b_1p + b_2p^2 + \dots + b_m p^m$ – оператор воздействия; p – оператор Лапласа; $Z(p) = a_0 + a_1p + a_2p^2 + \dots + a_n p^n$ – собственный оператор, допустимо описание связи входного X и выходного Y сигналов в форме:

$$X(b_0 + b_1p + b_2p^2 + \dots + b_m p^m) = Y(a_0 + a_1p + a_2p^2 + \dots + a_n p^n) \tag{1}$$

Задача состоит в получении решения уравнения (1) относительно выходного сигнала Y при известном входном сигнале X , коэффициентах b_0, \dots, b_m и a_0, \dots, a_n . Запишем одно из возможных решений уравнения (1) в операторной форме:

$$Y = \frac{Xb_0 - Ya_0}{a_n p^n} + \frac{Xb_1 - Ya_1}{a_n p^{n-1}} + \dots + \frac{Xb_m - Ya_m}{a_n p^{n-m}} - \frac{Ya_{m-1}}{a_n p^{n-m-1}} - \dots - \frac{Ya_{n-1}}{a_n p} \tag{2}$$

$n > m$.

Для получения решения во временной области необходимо выполнить интегрирование, так как p^{-q} означает q – кратное интегрирование слагаемых, содержащих $q = 1, \dots, n$.

Для этого уравнение (2) представим в тождественной форме:

$$Y = a_n^{-1} \left(p^{-n}(Xb_0 - Ya_0) + p^{1-n}(Xb_1 - Ya_1) + \dots + p^{m-n}(Xb_m - Ya_m) - p^{1+m-n}Ya_{m-1} - \dots - p^{-1}Ya_{n-1} \right);$$

$n > m$.

Осуществляя интегрирование последовательно с некоторым шагом по времени h , находим дискретные значения выходного сигнала $Y(t)$ для значений $t = 0, h, 2h, \dots, zh$, где z – число значений разбиваемого временного интервала.

На рисунке 1 представлена схема звена второго порядка, которая может быть использована при моделировании технологических процессов, динамических систем станков и систем виброизоляции объектов, где m – масса, кг; c – жесткость, Н/м; λ – сопротивление потерь, Нс/м; y – изменение положения центра тяжести, м; H – положение центра тяжести, м. На основании предложенной методики представим процедуру преобразования дифференциального уравнения системы, изображенной на рисунке 1.

Дифференциальное уравнение динамической системы с учетом введенных обозначений представляется в виде:

$$my'' + \lambda y' + cy = kx;$$

$$y'' = \frac{\partial^2}{\partial t^2} y; \quad y' = \frac{\partial}{\partial t} y;$$

$$m \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} y \right) + \lambda \left(\frac{\partial}{\partial t} y \right) + cy = kx.$$

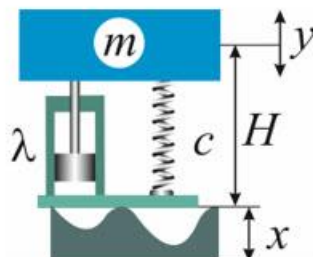


Рис. 1. Расчетная схема работы виброизолирующего устройства станка

Сведение к операторной форме полученного выражения с учетом связи производной с дифференциалом и введения символа (оператора) дифференцирования p , позволяет получить выражения:

$$py = \frac{\partial}{\partial t} y; p^2 y = \frac{\partial^2}{\partial t^2} y;$$

$$m p^2 y + \lambda p y + c y = kx.$$

Перейдем к стандартной (безразмерной) форме:

$$a_2 = m/c; a_1 = \lambda/c; k/c = 1;$$

$$a_2 p^2 y + a_1 p y + y = x. \quad (3)$$

Разделяя переменные x и y

$$y(a_2 p^2 + a_1 p + 1) = x,$$

получаем операторную передаточную функцию:

$$W_1(p) = \frac{1}{a_2 p^2 + a_1 p + 1},$$

по которой для сравнения можно вычислить реакцию на стандартный сигнал.

Получим решение уравнения (3) в рекурсивной форме:

$$m p^2 y = c(x - y) - \lambda p y;$$

$$y = c(x - y)/m p^2 - \lambda y/m p;$$

$$y = (c(x - y)/p - \lambda y) / m p.$$

Выполним интегрирование по методу Эйлера:

$$y = y + c(x - Y) h;$$

$$Y = Y + (y - \lambda Y) h / m. \quad (4)$$

Перейдем к рекуррентной форме:

$$y[i] = y[i-1] + c(x[i] - Y[i-1]) h;$$

$$Y[i] = Y[i-1] + (y[i] - \lambda Y[i-1]) h / m, \quad (5)$$

где $i = 1, \dots, z$.

Одно из полученных решений (4) и (5) либо их комбинацию можно применить для вычисления реакции системы на произвольный дискретно заданный входной сигнал.

Рассмотрим пример моделирования технологической системы круглошлифовального станка мод. 3В12, оснащенной виброизолирующим устройством, с параметрами:

Ma:=3000; # Масса системы, кг
Mg:=3; # Масса детали (заготовки), кг
Kz:=0.5; # Коэффициент загрузки
m0:=Ma+Mg*Kz; # Приведенная масса, кг
c0:=500; # Жесткость системы, Н/м
L0:= 1000; # Сопротивление потерь, Нс/м
Dx:=.0035; # Максимальное значение шумовой составляющей по методике, приведенной выше.

На рисунке 2, а изображены графики внешних воздействий $X(t)$, действующих на систему через поверхность палубы механообрабатывающего участка плавучей мастерской, и результат демпфирования $Y(t)$ при номинальных параметрах, а на рисунке 2, б изображен график результата демпфирования $Y_c(t)$ при $c=c_0/2$.

Для оценки влияния изменения параметров технологической системы на рисунке 3, а, б приведены графики реакции системы при изменении остальных параметров $m=m_0/2$ и $\lambda = 2\lambda_0$.

При анализе влияния параметров на свойства виброизолирующего устройства, находящегося под воздействием случайных возмущений, связанных с вибрациями палубы от внешнего оборудования и воздействий окружающей среды (морского волнения), уместен статистический подход сравнения.

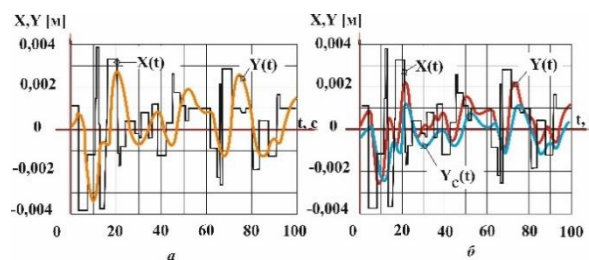


Рис. 2. Графики реакции системы:

а – при номинальных параметрах системы;
 б – при значении $c=c_0/2$

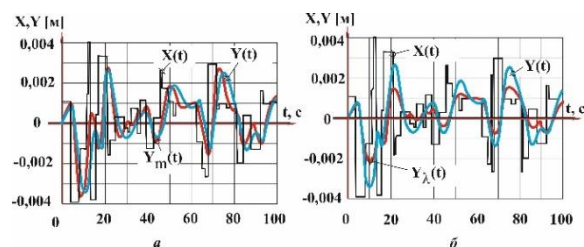


Рис. 3. Графики реакции системы:

а – при значении $m=m_0/2$;
 б – при значении $\lambda = 2\lambda_0$

Сравнивают статистические характеристики входного сигнала, обусловленного случайными изменениями частоты вибраций палубы, с выходным сигналом, характеризующим изменение положения центра тяжести приведенной массы. В зависимости от цели анализа такими характеристиками могут быть начальные и центральные моменты k -го порядка. Наиболее приемлемыми при анализе качества работы виброизолирующего устройства является дисперсия или стандартное отклонение в качестве меры оценки степени влияния значений его параметров на качество работы.

При сравнении дисперсии входного воздействия $D(X)$ с реакцией виброизолирующего устройства $D(Y)$ можно судить о качестве его работы. Введем коэффициент, который отражает степень демпфирования:

$$K = D(X)/D(Y).$$

Его величина будет расти по мере снижения $D(Y)$. Для вычисления дисперсии применима стандартная Maple-процедура вычисления

дисперсии $Dx = \text{describe}[\text{variance}](\text{seq}(X[i], i=1..z))$: для вычисления дисперсии входного воздействия и $Dy = \text{desbe}[\text{crivariance}](\text{seq}(Y[i], i=1..z))$: для вычисления дисперсии реакции виброизолирующего устройства.

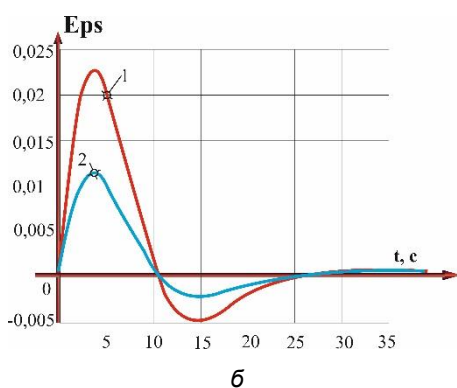
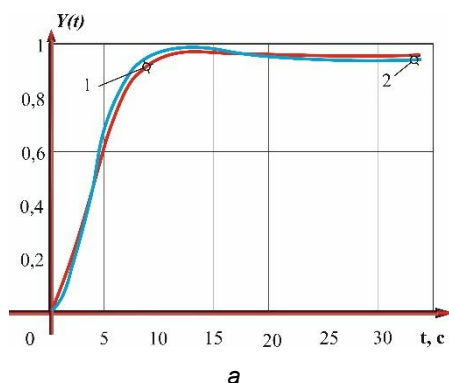


Рис. 4. Графики переходных характеристик (а) и погрешностей (б)

Результаты вычислений позволили получить следующие значения коэффициентов демпфирования:

$K_n = 1,78$ - для номинальных параметров виброизолирующего устройства;

$K_c = 3,75$ - при уменьшении жесткости c в два раза;

$K_m = 1,86$ - при уменьшении приведенной массы m в два раза;

$K_\lambda = 3,79$ - при увеличении сопротивления виброизолирующего устройства λ в два раза.

Для оценки величины погрешности дискретного преобразования передаточная функция системы приведена к стандартной форме:

$$W_2(p) = \frac{1}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2},$$

где $a_0 = 1$; $a_1 = \lambda/c$; $a_2 = m/c$.

На рисунке 4, а изображен график переходных характеристик, где $Y(t)$ – переходная характеристика, вычисленная в результате дискретного представления, а $y(t)$ – переходная характеристика, полученная в результате обратного преобразования Лапласа.

На рисунке 4, б изображены графики погрешности $Eps(t) = Y(t) - y(t)$, где кривая 1 получена при шаге дискретизации, большем в два раза, чем шаг дискретизации, соответствующий кривой 2.

Заключение

Рассмотренный метод позволяет вычислить реакцию системы на произвольный входной сигнал без процедур его преобразования. Погрешность полученного численного решения зависит от величины шага квантования. Введенный коэффициент демпфирования позволяет оценить качество работы виброизолирующей опоры и эффект от ввода коррекции её параметров.

Для реализации метода целесообразно предложить ряд конструктивных решений по обеспечению эффективного управления демпфированием виброизолирующей опоры металлорежущего станка при внешних воздействиях, например, представленные в работах [5, 6, 7], что позволит существенно повысить качество изготовления деталей в условиях плавучей мастерской.

Литература

1. Бесекаерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. Санкт-Петербург, Профессия, 2003, 744 с.
2. Вибрации в технике. Под ред. К.Ф. Фролова. Справочник в 6 томах. М., изд. «Машиностроение». 1981, 454 с.
3. Долгин В.П. Автоматическое управление техническими и технологическими объектами и системами. Численные методы анализа и синтеза систем и объектов. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003. – 320 с.
4. Хекерт Е.В., Владецкая Е.А., Братан С.М., Харченко А.О. Влияние внешних факторов на технологическую систему высокоточного станка в условиях плавучих мастерских. Морские интеллектуальные технологии, Санкт-Петербург, изд. НИЦ «МИТ», 2021, Т. 4, № 2 (53), С. 33-37.
5. Братан С.М., Владецкая Е.А., Владецкий Д.О., Харченко А.О. Повышение качества деталей при шлифовании в условиях плавучих мастерских. М., изд. «Вузовский учебник: ИНФРА-М», 2018, 154 с.
6. Владецкая Е.А., Харченко А.О., Братан С.М., Владецкий Д.О. Опора металлорежущего станка с активной виброизоляцией. Патент на полезную модель RU 159415 U1, 10.02.2016. Заявка № 2015125862/02 от 29.06.2015.
7. Владецкая Е.А., Харченко А.О., Братан С.М., Владецкий Д.О. Устройство автоматической виброзащиты металлорежущего станка. Патент на полезную модель RU 158629 U1, 20.01.2016. Заявка № 2015125213/02 от 25.06.2015.

References

1. Besekerskiy V.A., Popov Ye.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya. [Theory of automatic control systems]. Sankt-Peterburg, Professiya, 2003, 744 s.
2. Vibratsii v tekhnike. [Vibrations in technology]. Pod red. K.F. Frolova. Spravochnik v 6 tomakh. M., izd. «Mashinostroyeniye». 1981, 454 s.
3. Dolgin V.P. Avtomaticheskoye upravleniye tekhnicheskimi i tekhnologicheskimi ob'yektami i sistemami. Chislennyye metody analiza i sinteza sistem i ob'yektov. [Automatic control of technical and technological objects and systems. Numerical methods of analysis and synthesis of systems and objects]. Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2003. – 320 s.
4. Khekert Ye.V., Vladetskaya Ye.A., Bratan S.M., Kharchenko A.O. Vliyaniye vneshnikh faktorov na tekhnologicheskuyu sistemu vysokotochnogo stanka v usloviyakh plavuchikh masterskikh [The influence of external factors on the technological system of a high-precision machine tool in the conditions of floating workshops]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii, Sankt-Peterburg, izd. NITS «MIT», 2021, T. 4, № 2 (53), S. 33-37.
5. Bratan S.M., Vladetskaya Ye.A., Vladetskiy D.O., Kharchenko A.O. Povysheniye kachestva detaley pri shlifovanii v usloviyakh plavuchikh masterskikh [Improving the quality of parts when grinding in floating workshops]. M., izd. «Vuzovskiy uchebnyk: INFRA-M», 2018, 154 s.
6. Vladetskaya Ye.A., Kharchenko A.O., Bratan S.M., Vladetskiy D.O. Opora metallovezhushchego stanka s aktivnoy vibroizolyatsiyey. [Machine support with active vibration isolation]. Patent na poleznuyu model' RU 159415 U1, 10.02.2016. Zayavka № 2015125862/02 ot 29.06.2015.
7. Vladetskaya Ye.A., Kharchenko A.O., Bratan S.M., Vladetskiy D.O. Ustroystvo avtomaticheskoy vibrozashchity metallovezhushchego stanka. [Automatic vibration protection device for a metal-cutting machine]. Patent na poleznuyu model' RU 158629 U1, 20.01.2016. Zayavka № 2015125213/02 ot 25.06.2015

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

Анастас Леонидович Боран-Кешишьян, кандидат технических наук, проректор Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Новороссийск, пр-т Ленина, 93. e-mail: bk.anastas@gmail.com

Anastas L. Boran-Keshishyan, Ph.D. Sci. (Eng), vice-rector of Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 353924, Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93. e-mail: bk.anastas@gmail.com

Екатерина Александровна Владецкая, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: vladetska@rambler.ru

Ekaterina A. Vladetskaya Ph.D. Sci. (Eng.), Assosiat Ph.D. Sci. (Eng.), lecturer of the Department of Mechanical engineering technology, Sevastopol state university, 33 Universitetskaya, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: vladetska@rambler.ru

Сергей Михайлович Братан, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения, Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: serg.bratan@gmail.com

Sergey M. Bratan, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department Department of Mechanical engineering technology, Sevastopol state university, 33 Universitetskaya, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: serg.bratan@gmail.com

Александр Олегович Харченко, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения, Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: khao@list.ru

Alexander O. Kharchenko, Ph.D. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Mechanical engineering technology, Sevastopol state university, 33 Universitetskaya, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: khao@list.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 13.09.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.02.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 22.02.2023.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Научная статья

УДК 621.431.74.016

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.009>

Анализ влияния процесса сгорания на конвективный теплообмен в цилиндре судового высокооборотного дизеля

Б.И. Руднев¹ povalichina@mail.ru, О.В. Повалихина¹ povalichina@mail.ru

¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. При совершенствовании существующих математических моделей локального теплообмена в камере сгорания судовых высокооборотных дизелей до последнего времени считалось, что процесс сгорания топлива оказывает большое влияние на параметры конвективного теплообмена. Однако современные экспериментальные исследования показали, что это влияние незначительно. Величины экспериментальных конвективных тепловых потоков, полученных при работе судового высокооборотного дизеля на топливе и при «чистом» сжатии отличаются в среднем на 6 – 10%. Целью настоящей статьи является представление и обсуждение результатов анализа влияния процесса сгорания на конвективный теплообмен в цилиндре судового высокооборотного дизеля. Представленные в статье экспериментальные данные показывают, что формирование тепловой нагрузки цилиндропоршневой группы в период активного тепловыделения определяется в основном процессом радиационного теплообмена. Это дает проектантам и исследователям возможность создания математических моделей, описывающих процессы локального теплообмена в камере сгорания судовых высокооборотных дизелей с большей точностью и сокращения сроков экспериментальной доводки новых образцов.

Ключевые слова: судовый высокооборотный дизель, камера сгорания, конвективный теплообмен, процесс сгорания топлива.

Для цитирования: Руднев Б.И., Повалихина О.В. Анализ влияния процесса сгорания на конвективный теплообмен в цилиндре судового высокооборотного дизеля, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 86—90. DOI:10.37220/MIT.2023.59.1.009

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.009>

Analysis of influence process combustion on convective heat transfer in cylinder of marine high speed diesel

Boris I. Rudnev¹ povalichina@mail.ru, Olga V. Povalikhina¹ povalichina@mail.ru

¹Far Eastern State Technical Fisheries University, Russian Federation

Abstract. For creation modern mathematical models of local heat transfer in marine high speed diesels combustion chamber now is consider that the process of combustion fuel determines large influence to parameters of convective heat transfer. Thus modern experimental investigations have indicated that influence is slightly meaning. Data of experimental convective heat fluxes given for operation marine high speed diesel in fuel and for undreamed compression in contrast to medium 6 – 10 per cent. Purpose this article is presentation and discussion of results analysis for influence combustion process on convective heat transfer in a cylinder marine high speed diesel. Experimental data reveal formation of thermal power cylinder piston details during active radiative heat transfer is determine in this article. Designers and researchers receive opportunity for creation mathematical models writing processes of local heat transfer in marine high speed diesels combustion chamber with high accuracy and decrease of experimental times for drive of modern samples.

Key words: marine high speed diesel, combustion chamber, convective heat transfer, process of combustion fuel.

For citation: Boris I. Rudnev, Olga V. Povalikhina, Analysis of influence process combustion on convective heat transfer in cylinder of marine high speed diesel, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 86—90. DOI:10.37220/MIT.2023.59.1.009

Введение

До недавнего времени считалось, что процесс сгорания топлива в цилиндре дизеля оказывает весьма существенное влияние на параметры конвективного теплообмена [1–6]. Однако проведенные в последние годы экспериментальные исследования [7,8] изменили эту точку зрения.

Целью настоящей статьи является представление и обсуждение результатов экспериментального исследования, выполненного авторами, по оценке влияния процесса сгорания топлива на характеристики конвективного теплообмена в цилиндре судового высокооборотного дизеля.

Колебания температуры и локальные тепловые потоки на поверхности крышки цилиндра судового высокооборотного дизеля при «чистом» сжатии

Для определения параметров количественного влияния процесса сгорания на конвективный теплообмен в цилиндре судового высокооборотного дизеля типа 8 ЧН 13/14 авторами статьи было проведено специальное экспериментальное исследование. Основная цель которого состояла в получении опытных данных, показывающих степень влияния процесса сгорания топлива на параметры конвективного теплообмена. Для этого с помощью измерительного комплекса по методике, представленными авторами ранее в [9, 10], были измерены колебания температуры на поверхности крышки цилиндра указанного выше судового дизеля при отключенной подаче топлива в исследуемый цилиндр, то есть при «чистом» сжатии. Их величины показаны на рис. 1.

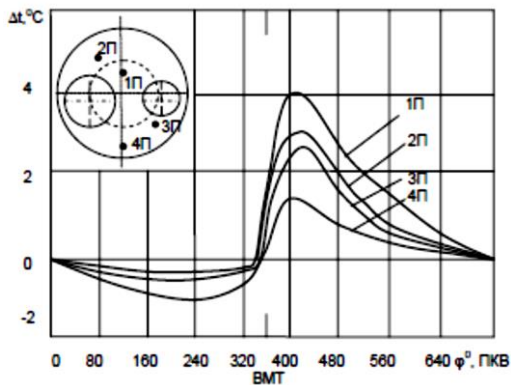


Рис. 1. Колебания температуры на поверхности крышки цилиндра судового высокооборотного дизеля при «чистом» сжатии, $n=1700\text{мин}^{-1}$

Обработка колебаний температуры на ЭВМ по специальной программе позволила получить локальные тепловые потоки при «чистом» сжатии и частоте вращения коленчатого вала, соответствующей номинальному режиму работы исследованного судового дизеля – 1700мин^{-1} . Отмеченные локальные тепловые потоки представлены на рис. 2.

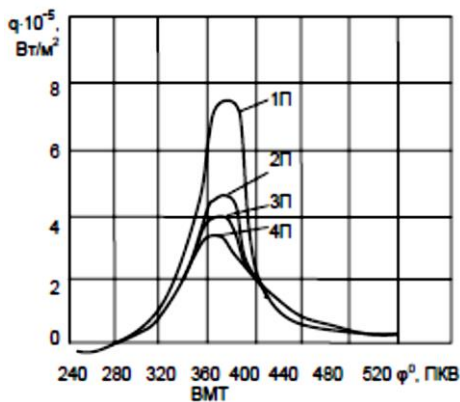


Рис. 2. Изменение плотности тепловых потоков на поверхности крышки цилиндров при «чистом» сжатии, $n=1700\text{мин}^{-1}$

Влияние процесса сгорания на параметры конвективного теплообмена в цилиндре судового дизеля

Значения плотности локальных тепловых потоков, обусловленных процессами суммарного (радиационно-конвективного) и радиационного теплообмена, для крышки цилиндра судового высокооборотного дизеля на номинальном режиме работы $P_{me}=0,61\text{ МПа}$, $n=1700\text{ мин}^{-1}$, получены авторами настоящей статьи ранее [10] и представлены на рис. 3.

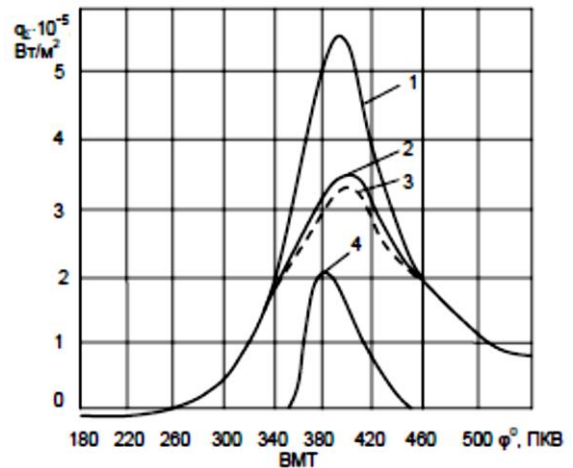


Рис. 3 Изменение плотности тепловых потоков в точке 4П на поверхности крышки цилиндров судового высокооборотного дизеля на номинальном режиме работы $P_{me}=0,61\text{ МПа}$, $n=1700\text{мин}^{-1}$: 1 – суммарный (радиационно-конвективный); 2 – конвективный при работе на топливе; 3 – конвективный при «чистом» сжатии; 4 – радиационный

Необходимо отметить, что под позицией 2 на этом рисунке показано изменение плотности конвективного теплового потока, полученного в виде разности между суммарным (позиция 1) и радиационным (позиция 4) тепловыми потоками при работе судового высокооборотного дизеля на топливе. Под позицией 3 на рис. 3 представлено изменение плотности конвективного теплового потока, полученного при «чистом» сжатии (при отключении подачи топлива в исследуемый цилиндр). Сравнение показывает, что в период активного тепловыделения в камере сгорания судового дизеля (ВМТ – 90 градусов поворота коленчатого вала после ВМТ) максимальные величины конвективных тепловых потоков, полученных при работе на топливе и при «чистом» сжатии отличаются примерно на $5 - 6\%$. Таким образом, экспериментально доказано, что влияние процесса сгорания топлива на конвективный теплообмен в цилиндре дизеля не столь велико как считалось ранее [1 – 6].

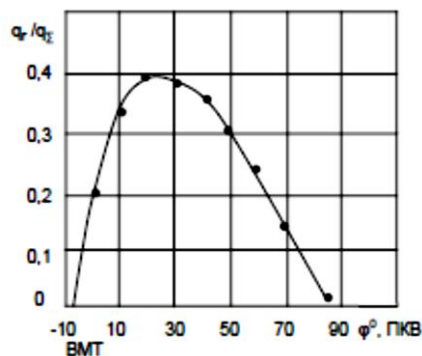


Рис. 4. Отношение суммарного и радиационного тепловых потоков для точки 4П на поверхности крышки цилиндров судового дизеля

Представленные экспериментальные данные позволяют сделать очень важный с научной точки зрения вывод, что в период активного тепловыделения в камере сгорания судового дизеля основную роль в формировании тепловой нагрузки деталей цилиндропоршневой группы играет радиационный тепловой поток.

На рис. 4. показано отношение суммарного и радиационного тепловых потоков для точки 4П на поверхности крышки цилиндров судового высокооборотного дизеля.

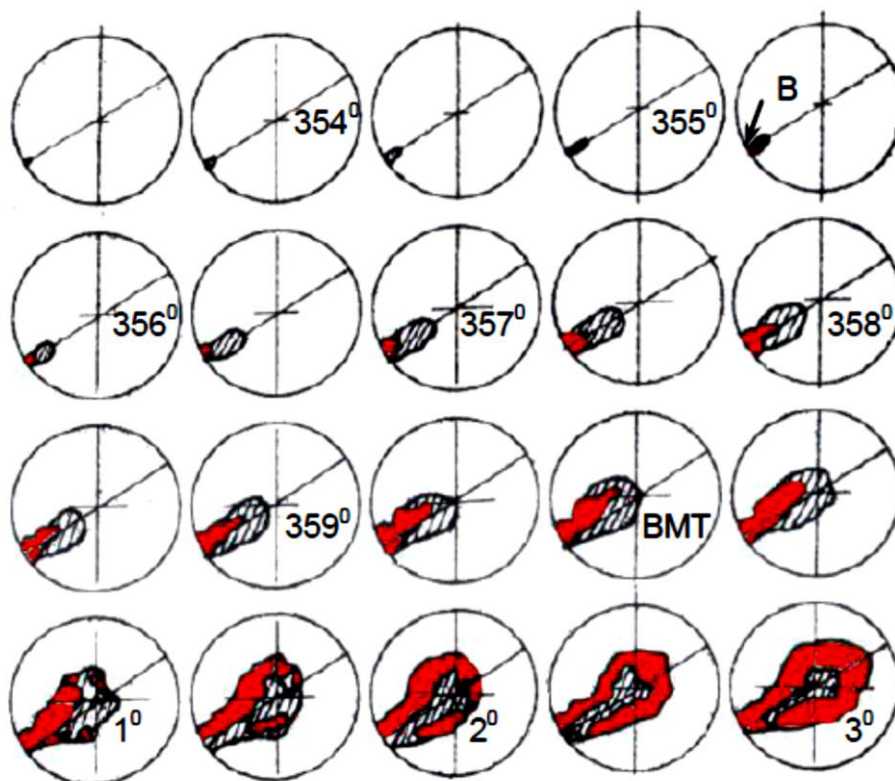


Рис. 5. Кинограмма процесса охвата пламенем топливного факела в камере сгорания высокооборотного дизеля по углу поворота коленчатого вала

Эта точка является периферийной для поверхности крышки цилиндра (см. рис. 1) и даже для нее доля радиационного теплового потока составляет примерно 40%. Для точек, расположенных ближе к центру камеры сгорания, эта величина может достигать 60% и более. Отмеченное экспериментально подтверждается и другими исследованиями, в которых радиационный тепловой поток измерялся в двух точках поверхности крышки цилиндра (на периферии и в центре) [8].

При анализе влияния процесса сгорания топлива на параметры конвективного теплообмена в камере сгорания судового дизеля необходимо учитывать динамику охвата пламенем топливного факела и ряд других факторов, связанных с турбулентным характером этого процесса [11,12]. В качестве примера на рис. 5 показаны кинограммы процесса

охвата пламенем топливного факела в камере сгорания высокооборотного дизеля по углу поворота коленчатого вала с шагом 0,5 градуса [11]. Буквой «В» на рис. 5 обозначено начало процесса воспламенения топлива ($\approx 355,5^\circ$). Из него видно, пламя почти полностью охватывает топливный факел лишь при 3 градусах поворота коленчатого вала после ВМТ и далее. При этом пламя не занимает всего объема камеры сгорания, а скорость движения рабочего тела, обусловленная перемещением поршня в цилиндре судового дизеля весьма умеренная.

Отмеченные выше положения весьма существенно расширяют наши представления об особенностях протекания процесса конвективного теплообмена в камере сгорания и дают конструкторам очень важную, экспериментальную

проверенную информацию для уточнения целого ряда положений при математическом моделировании процессов теплообмена на стадии проектирования новых моделей судовых дизелей.

Заключение

Представленные в статье результаты исследования, выполненные авторами на судовом высокооборотном дизеле типа 8 ЧН 13/14 показали, что влияние процесса сгорания на характеристики

конвективного теплообмена незначительно и в период активного тепловыделения основную роль в формировании тепловой нагрузки деталей цилиндропоршневой группы играет радиационный тепловой поток. Это дает возможность сделать ряд важных уточнений в существующих математических моделях теплообмена в камере сгорания и сократить сроки экспериментальной доводки новых моделей судовых высокооборотных дизелей.

Литература

1. Стефановский Б.С. Теплонапряженность деталей быстроходных поршневых двигателей. М.: Машиностроение, 1978, 128 с.
2. Розенблит Г.Б. Теплопередача в дизелях. М.: Машиностроение, 1977, 216 с.
3. Петриченко Р.М., Петриченко М.Р. Конвективный теплообмен в поршневых машинах. Л.: Машиностроение, 1979, 232 с.
4. Хеншелл С.Х. Среднеоборотные судовые дизели. Л.: Судостроение, 1976, 304 с.
5. Возницкий И.В., Камкин С.В., Шмелев В.П. и др. Рабочие процессы судовых дизелей. М.: Транспорт, 1979, 208 с.
6. Фомин Ю.Я., Горбань А.И., Добровольский В.В. и др. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Л.: Судостроение, 1989, 344 с.
7. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 472с.
8. Dent J.C. Siluaman S.I. Convective and radiative heat transfer in a high swirl direct injection Diesel engine // SAE Preprints, 1977, №770407, 26 p.
9. Руднев Б.И., Поваляхина О.В. Контрольно-измерительный комплекс для исследования параметров рабочего процесса и радиационно-конвективного теплообмена в камере сгорания судового высокооборотного дизеля // Морские интеллектуальные технологии, 2022, №2, Часть 1, С. 73 – 78.
10. Руднев Б.И., Поваляхина О.В. Результаты экспериментального исследования локальных тепловых потоков на поверхности крышки цилиндров судового высокооборотного дизеля // Морские интеллектуальные технологии, 2022, №2, Часть 4, С. 123 – 127.
11. Махов В.З. Процессы сгорания в двигателях. М.: МАДИ, 1980, 76 с.
12. Кузнецов В.Р., Сабельников В.А. Турбулентность и горение. М.: Наука, 1986, 288 с.

References

1. Stefanovskij B.S. Teplonapryazhennost' detalej bystrokhodnykh porshnevykh dvigatelej. [Terminal power of details high speed piston engines] M.: Mashinostroenie, 1978, 128 s.
2. Rozenblit G.B. Teploperedacha v dizelyakh. [Heat transfer in diesels] M.: Mashinostroenie, 1977, 216 s.
3. Petrichenko R.M., Petrichenko M.R. Konvektivnyj teploobmen v porshnevykh mashinakh. [Convective heat transfer in piston machines] L.: Mashinostroenie, 1979, 232 s.
4. KHenshell S.KH. Sredneoborotnye sudovye dizeli. [Medium speed marine diesel] L.: Sudostroenie, 1976, 304 s.
5. Voznitskij I.V., Kamkin S.V., SHmelev V.P. i dr. Rabochie protsessy sudovykh dizelej. [Operation processes of marine diesels] M.: Transport, 1979, 208 s.
6. Fomin YU.YA., Gorban' A.I., Dobvol'skij V.V. i dr. Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya. [Marine internal combustion engines] L.: Sudostroenie, 1989, 344 s.
7. Kavtaradze R.Z. Lokal'nyj teploobmen v porshnevykh dvigatelyakh. [Local heat transfer in piston engines] M.: Izd-vo MGTU im. N.EH. Baumana, 2007, 472s.
8. Dent J.C. Siluaman S.I. Convective and radiative heat transfer in a high swirl direct injection Diesel engine // SAE Preprints, 1977, №770407, 26 p.
9. Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Kontrol'no-izmeritel'nyj kompleks dlya issledovaniya parametrov rabocheho protsesssa i radiatsionno-konvektivnogo teploobmena v kamere sgoraniya sudovogo vysokooborotnogo dizelya [Control measured complex for the investigation of parameters of operation process and radiative convection heat transfer in the combustion chamber of a marine high speed diesel engine] // Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2022, №2, CHast' 1, S. 73 – 78.
10. Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Rezul'taty ehksperimental'nogo issledovaniya lokal'nykh teplovykh potokov na poverkhnosti kryshki tsilindrov sudovogo vysokooborotnogo dizelya [Results of experimental investigation of local heat fluxes on surface of cap cylinders of marine high speed diesel] // Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2022, №2, CHast' 4, S. 123 – 127.
11. Makhov V.Z. Protsessy sgoraniya v dvigatelyakh. [Processes of combustion in engines] M.: MADI, 1980, 76 s.
12. Kuznetsov V.R., Sabel'nikov V.A. Turbulentnost' i gorenje. [Processes of combustion in engines] M.: Nauka, 1986, 288 s.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Борис Иванович Руднев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры холодильной техники, кондиционирования и теплотехники, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток ул. Луговая, 52б, e-mail: povalichina@mail.ru

Boris I. Rudnev, Dr.Sci. (Eng), Professor, Professor of Department of refrigeration equipment, condition and heat transfer, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, St. Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: povalichina@mail.ru

Ольга Владимировна Повалихина, доцент, доцент кафедры холодильной техники, кондиционирования и теплотехники, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток ул. Луговая, 52б, e-mail: povalichina@mail.ru

Olga V. Povalikhina, assistant professor, assistant professor of Department of refrigeration equipment, condition and heat transfer, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, St. Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: povalichina@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 29.12.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.01.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 24.01.2023.

Научная статья

УДК 621.431.7

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.010>

Применение сетей Байеса для создания модели возникновения риска пожара в машинном отделении

Н.Е. Шулика¹, Н.А. Поддубный¹, А.И. Епихин¹ bsmbeton@mail.ru, Э.А. Епихин¹

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, Новороссийск

Аннотация. В статье рассматриваются факторы, влияющие на риск, или моделирование риска неконтролируемого пожара в машинном отделении судна, что является актуальной задачей в контексте внедрения автономных судов. Цель данной статьи заключается в том, чтобы повысить привлекательность использования алгоритмов, основанных на Байесовских сетях в морской отрасли. Байесовские сети представляют собой класс вероятностных моделей, основанных на статистике, теории принятия решений и теории графов. Основное внимание уделено использованию моделей Байеса непосредственно в отношении вероятности возникновения пожаров в машинном отделении судна и способов с их предотвращением. Цель состоит в том, чтобы продемонстрировать потенциал байесовских сетей как понятного инструмента, который помогает повысить пожаробезопасность в машинном отделении. Байесовские сети основаны на технологиях, которые применяются в сфере IT. В настоящее время эти технологии развиваются и становятся общедоступными для разных программных систем. Поэтому Байесовские все больше находят применение и в других областях. Предлагается рассмотреть возможность применения этой технологии для морской отрасли. Выявление факторов, влияющих на неконтролируемый пожар в машинном отделении, и разработка упреждающей модели риска могут помочь лучше понять и проанализировать данный инцидент, что, в свою очередь, может способствовать соответствующему обновлению стандартов и правил в отношении автономных судов. Модель Байеса в этом исследовании принята предпочтительной для идентификации данных факторов. В модели было принято соответствие общим особенностям машинного отделения стандартного судна. Модель может быть использована для анализа пожара в машинном отделении судов любой степени автономности. В статье определены факторы, влияющие на риск возникновения неконтролируемого пожара в машинном отделении, для построения модели риска с использованием Байесовских сетей.

Ключевые слова: судно, машинное отделение, риск возникновения пожара, сети Байеса, пожаробезопасность
Для цитирования: Шулика Н.Е., Поддубный Н.А., Епихин А.И., Епихин Э.А. Применение сетей Байеса для создания модели возникновения риска пожара в машинном отделении Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 91—99. DOI:10.37220/MIT.2023.59.1.010

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.010>

Application of Bayesian networks to create a fire risk model in the engine room

Nikita E. Shulika¹, Nikita A. Poddubniy¹, Alexey I. Epikhin¹ bsmbeton@mail.ru, Eduard A. Epikhin¹

¹ Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. The article discusses the factors influencing the risk, or modeling the risk of an uncontrolled fire in the engine room of a ship, which is an urgent task in the context of the introduction of autonomous ships. The purpose of this article is to increase the attractiveness of using algorithms based on Bayesian networks in the maritime industry. Bayesian networks are a class of probabilistic models based on statistics, decision theory and graph theory. The main attention is paid to the use of Bayesian models directly in relation to the probability of fires in the ship's engine room and ways to prevent them. The goal is to demonstrate the potential of Bayesian networks as an understandable tool that helps improve fire safety in the engine room. Bayesian networks are based on technologies that are used in the IT field. Currently, these technologies are developing and becoming publicly available for various software systems. Therefore, Bayesian methods are increasingly being used in other areas. It is proposed to consider the possibility of applying this technology to the maritime industry. Identifying the factors that contribute to an uncontrolled engine room fire and developing a proactive risk model can help to better understand and analyze the incident, which in turn can lead to an appropriate update of standards and regulations for autonomous ships. The Bayesian model in this study is adopted as the preferred one for identifying these factors. The model was adopted to match the general features of the engine room of a standard ship. The model can be used to analyze a fire in the engine room of ships of any degree of autonomy. The article identifies factors that affect the risk of an uncontrolled fire in the engine room, to build a risk model using Bayesian networks.

Key words: ship, engine room, fire risk, Bayesian network, fire safety

For citation: Nikita E. Shulika, Nikita A. Poddubniy, Alexey I. Epikhin, Eduard A. Epikhin. Application of Bayesian networks to create a fire risk model in the engine room. Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 91—99. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.010

Введение

Цель данной статьи состоит в том, чтобы познакомить морскую отрасль с использованием байесовских сетей. Байесовские сети представляют собой класс вероятностных моделей, основанных на статистике, теории принятия решений и теории графов.

Основное внимание уделяется инструментам, которые помогут принимать решения, непосредственно в отношении возникновения пожаров в машинном отделении и вопросов, связанных с их предотвращением.

Цель состоит в том, чтобы продемонстрировать потенциал байесовских сетей как понятного инструмента, который помогает повысить пожаробезопасность в машинном отделении.

Байесовские сети основаны на технологиях, которые применяются в сфере ИТ. В настоящее время эти технологии развиваются и становятся общедоступными для разных программных систем. Поэтому байесовские сети начали применять и в других областях. Таким образом, можно рассмотреть возможность применения этой технологии для морской отрасли [8], [10].

На примере, который представляет проблему принятия решения в морской технической отрасли, объясним потенциал использования байесовских сетей.

История возникновения пожаров на судах

Более 70 % поверхности земли покрыто водой, которая соединяет семь континентов вместе. Это заставило человека в начале 4-го тысячелетия до н.э. задуматься об исследовании мира, а затем о торговле товарами через море. С тех пор акцент на морском транспорте усилился и в конечном итоге произвел революцию благодаря первому внедрению дизельных двигателей для использования на судах в 1898 году.

В настоящее время более 80 % мировой торговли товарами по объему перевозится судами по морю, что сделало судоходную отрасль важным игроком в мировой экономике. Использование ископаемого топлива для приведения в движение судов, с одной стороны, позволяло судам двигаться быстрее и обеспечивало возможность эксплуатации огромных судов, а с другой стороны, создавало потенциальный риск пожара на судах.

Международная морская организация (ИМО) показала, что из всех зарегистрированных пожаров в районе открытого моря 94 % пожаров начались в кормовой части судов. Критический обзор аварии на танкерах AFRAMAX (с 1978 по 2004) показал, что 2/3 всех зарегистрированных пожаров на судах произошли в машинном отделении. Согласно анализу сообщений о пожарах, машинные помещения, являются наиболее уязвимой зоной для серьезного пожара по сравнению с другими отсеками на борту судна.

Теорема Байеса

Название происходит от имени Томаса Байеса, английского статистика, философа (1701- 1761), который известен тем, что сформулировал свою конкретную теорему об обратной вероятности, которая позже была названа Теорема Байеса.

Идея Томаса Байеса позже была развита Пьером-Симоном Лапласом, который в 1812 году представил современную формулировку, которая определялась следующим образом:

$$P(A|B). P(B) = P(A, B)$$

Где мы получаем:

$$P(B|A). P(A) = P(A, B)$$

Комбинация двух вышеупомянутых равенств дает следующую формулу Байеса:

$$P(A|B) = (P(A).P(B|A)) / P(B)$$

Где $P(A)$ и $P(B)$ - вероятности событий A и B, независимые друг от друга. $P(A|B)$ - условная вероятность того, что данное B истинно. Аналогично, $P(B|A)$ является ли условная вероятность того, что B, данное A, истинно.

Сравнение статистических данных о пожарах в машинном отделении

Приводится база данных за период за 15-летний период наблюдений, произошло 2370 пожаров. Грузовые суда и танкера имели самую высокую частоту аварий 42 % и 32 % соответственно.

На рисунке 1 показана статистика о случившихся пожарах на различных типах судов за 15-летний период исследования.

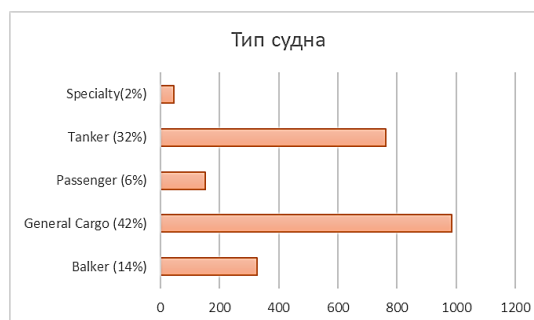


Рис. 1. Статистика пожаров на различных типах судов за 15-летний период исследования

Дополнительные исследования отчетов об авариях на танкерах в базе данных показали, что среди 763 аварий на танкерах большинство пожаров произошло, когда суда находились в плавании. На рисунке 2 показано распределение состояния судна во время возникновения пожара [9].



Рис. 2. Состояние судна во время возникновения пожара

Этот отчет показывает, что из 763 зарегистрированных несчастных случаев на танкерах 371 из них произошел пожар в машинном отделении, что составляет примерно половину несчастных случаев. Рисунок 3 иллюстрирует распределение местоположения зарегистрированных пожаров.

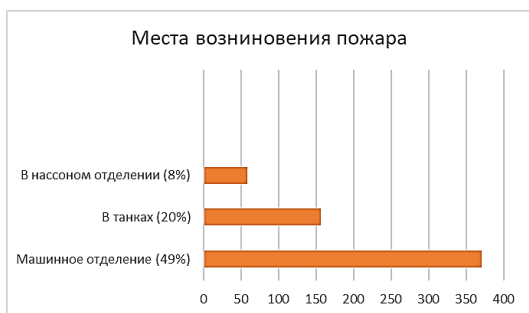


Рис. 3. Местоположение зарегистрированных пожаров

Из 371 несчастного случая в машинном отделении 191 несчастный случай. Распределение серьезного пожара в машинном отделении показывает, что котел и главный двигатель были в большей степени связаны с иницированием пожара по сравнению с другими механизмами.

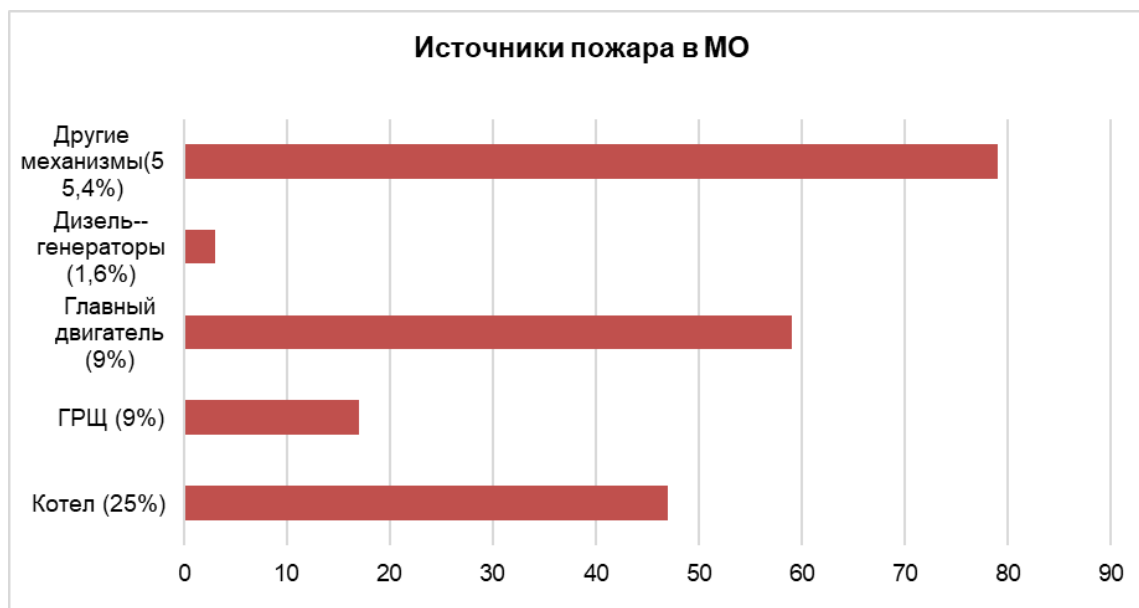


Рис. 4. Источники пожаров в машинном отделении судна

Данные были взяты из открытого источника *Lloyd's data (1978- 1992)*.

Структурирование сетей Байеса на основе статистики

В результате проведенных исследований была создана структура Байесовской сети, которая описывает взаимосвязи между факторами, которые способны вызвать пожар в МО.

Описание метода

Байесовская сеть простым словом представляет собой набор прямых ациклических графиков и таблиц свойств. График включает конечное число узлов и связанных с ними дуг, которые представляют взаимосвязь между узлами. Качественная характеристика сети представлена графиком, а вероятностная часть используется для количественной оценки сети.

Как правило, узлы представлены овальной формой или циклом, а в некоторых случаях - прямоугольником или ромбовидной формой. В зависимости от определения узлов, каждая фигура может представлять собой особый категория переменных, таких как Вероятность, Решение и

Полезность. Дуги, иллюстрирующие взаимосвязь между узлами, представляют собой стрелки только с одним направлением.

Ациклический атрибут сети означает, что, предполагая наличие трех узлов А, В и С, начиная с узла до других узлов, следующих по направлению дуг, никогда не заканчивается в начальной точке. Другими словами, в сети не разрешается иметь цикл. В сетях Байеса каждый узел может иметь два или более статуса, и значение каждого статуса может быть случайным переменная с дискретным или непрерывным распределением. Хотя количество узлов в модели не ограничено, но чем больше количество узлов, тем сложнее модель с точки зрения качественного и количественного анализа.

В сетях Байеса узлы являются условно независимыми, что означает, что условная вероятность каждого узла, заданного его родительским узлом, зависит только от вероятности родителей этого узла. Другими словами, в случае знания о статусе родителей узла, знания о предках узла не добавляет никакой информации к знаниям о состоянии упомянутого узла [11].

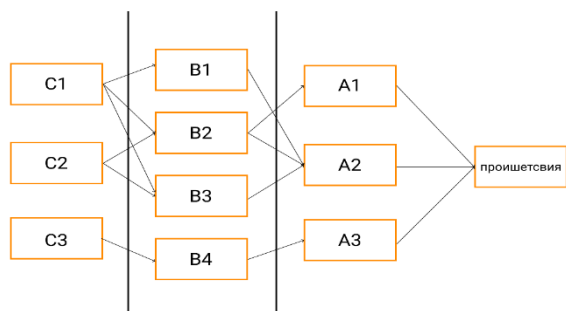


Рис. 5. Взаимосвязь между факторами и вероятностями возникновения пожара в МО

В зависимости от типа судна

Статистика аварий показала, что риск аварии не одинаков для всех типов судов. В предложенной модели Байеса, **тип судна**, введенный в качестве узла принятия решений, который является условным **A** для других организационных или технических факторов, таких как: флаг судна (**B1**), Регистрация класса судна (**B2**), Возраст судна (**B3**), Техническое обслуживание (**B4**) и Культура безопасности (**B5**). Тип судна, который имеет пять состояний в этом исследовании (Passenger, Tanker, Container, Bulker и General Cargo), выражается факторами: регистрации, возраста судна и флага судна. Это не обязательно означает, что изменение типа судна приводит к изменению класса регистрации, флага или возраста судна.

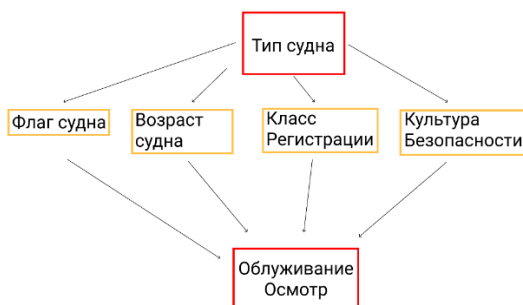


Рис. 6. Зависимости от характеристик судна

В зависимости от культуры безопасности

Культура безопасности. Всякий раз, когда человек, прямо или косвенно, связан с каким-либо типом аварии, культура безопасности становится одним из влияющих факторов при анализе рисков. Метод оценки культуры безопасности не является простым и уникальным. В зависимости от того, как определяется культура безопасности, различные подходы могут быть адаптированы для оценки культуры безопасности в отрасли, и разные подходы дадут разные результаты.

Статистика аварий показала, что влияние некоторых факторов (например, тип судна, флаг судна – класс реестра, классификационное общество и т.д.) на частоту аварий и уровень безопасности судов не одинаково для всех типов судов. Можно сделать вывод, что вышеупомянутые влияющие факторы оказывают влияние на культуру безопасности, что приводит к повышению или снижению общего уровня безопасности судна.

В модели Байеса для пожара в машинном отделении культура безопасности это дочерний узел из пяти родителей: тип судна, возраст судна, флаг судна, подготовка экипажа, класс регистра. Изменение состояния любого из родителей может привести к изменению ценности культуры безопасности.



Рис. 7. Зависимость от культуры безопасности

В зависимости от технического обслуживания

Проблема заключается в том, что существует типичный формат отчетности об авариях, в котором сообщается причина аварии, спецификация судов и общая информация. Следовательно, уровень обслуживания при анализе рисков более количественно определяется экспертным заключением. Альтернативный подход к оценке технического обслуживания заключается в использовании сметных затрат (инвестиций) на техническое обслуживание (для различных типов, размеров и возраста судов) и применении мер по оценке технического обслуживания.

В этом исследовании техническое обслуживание классифицируется в зависимости от состояния культуры безопасности на судне. В дополнение к культуре безопасности, возраст судна, тип судна, реестр флага судна и реестр класса судна также представлены в качестве родительских узлов технического обслуживания.

В зависимости от факторов технического обслуживания

Техническое обслуживание является одним из важных факторов, которые могут влиять на многие другие факторы в модели.

На схеме показаны факторы, которые могут измениться, если в модели изменится статус технического обслуживания.

- Вероятность утечки в МО.
- Вероятность обнаружения пожара.
- Вероятность отказа пожарного насоса.
- Вероятность отказа в системе противопожарной заслонки.
- Вероятность отказа быстрозапорных клапанов.
- Вероятность утечки в сепараторной.

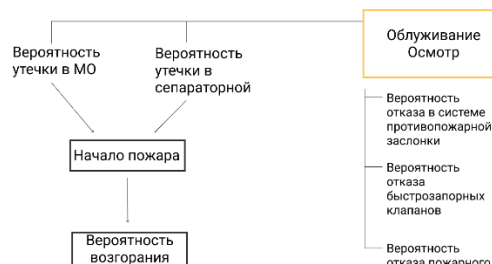


Рис. 8. Факторы технического обслуживания

В зависимости от вероятности утечки в МО

Необнаруженная утечка является иницирующим опасным событием, которое может привести к возгоранию, если углеводороды контактируют с горячей точкой или источником воспламенения.

На рисунке представлены факторы, влияющие на частоту утечек в машинном отделении.

Утечка в области машинного отделения достигает шести состояний (утечка в главном двигателе, дизель генераторе, котле, инсинераторе и в других механизмах). В дополнение к техническому обслуживанию, которое влияет на вероятность утечки, статус плавания судна (в плавании/остановке) также может определять вероятность утечки. Например:

1) Главный двигатель работает, а котел остановлен во время плавания и наоборот, когда судно остановлено, главный двигатель остановлен, а котел работает.

2) Инсинератор может работать только тогда, когда судно находится в плавании и находится на расстоянии не менее 12 морских миль от берега. Согласно статистическим данным, представленным выше, суда показали большую склонность к возгоранию в состоянии плавания, чем на стоянке.

В зависимости от места начала пожара в МО

Начало пожара инициируется при возникновении утечки и контакта углеводородов с источником энергии (воспламенение). Вероятность воспламенения зависит от температуры воспламеняющегося углеводорода и типа источника воспламенения.

Вероятность воспламенения зависит от температуры воспламеняющегося углеводорода, плотности горячей точки в области и типа источника воспламенения.

Начало пожара в качестве непосредственного узла для неконтролируемого пожара в машинном отделении получает три состояния (пожар в области машинного отделения, пожар в сепараторной и пожар без пламени).

В зависимости от вероятности обнаружения пожара

Система орошения, быстрозапорные клапаны, противопожарные заслонки, система пенотушения и быстроедействие зависят от скорости обнаружения пожара.

Своевременные действия экипажа также зависят от этого.

Факторы, которые влияют на обнаружение пожара

- Отказ противопожарных заслонок.
- Отказ системы пенотушения.
- Выход из строя системы орошения.
- Вероятность выхода из строя быстрозапорных клапанов.
- Своевременные действия.

На рисунке представлена зависимость между вероятностью обнаружения пожара и вышеупомянутыми факторами.



Рис. 9. Вероятность обнаружения пожара

Своевременные действия

Правильное действие представлено как дочерний узел недостаточной подготовки, несоблюдения инструкции, неэффективного плана действий в чрезвычайных ситуациях и вероятности обнаружения пожара. Обучение и план действий в чрезвычайных ситуациях являются стандартом в оффшорной и морской промышленности.

Все правила, касающиеся плана действий в чрезвычайных ситуациях и обучения, задокументированы в SOLAS, которые применяются ИМО. Возможные недостатки заключаются в следующем:

- Вероятность наличия недостаточного плана действий в чрезвычайных ситуациях и несоблюдения инструкции.
- Вероятность недостаточной подготовки.
- Вероятность обнаружения пожара.

Вероятность своевременного принятия надлежащих мер представлена на рисунке в соответствии с предложенной моделью Байеса для морского пожара/взрыва при анализе человеческих и организационных факторов, участвующих в предотвращении пожара.

Тушение пожара и влияющие факторы

Тушение пожара является одной из мер по борьбе с пожаром. При тушении пожара обычно в каждой группе два пожарных, оснащенных противопожарным снаряжением, атакуют огонь. Вероятность неспособности подавить пожар одной группой пожарных зависит от масштаба пожара и способностей пожарных. Члены экипажа на борту судов обучены пожаротушению, но их профессия не пожарный, поэтому моряки считаются средне подготовленными к работе в условиях пожаротушения. Правильное действие вовремя — это родительский узел, который может повлиять на вероятность ручного тушения пожара персоналом. В случае выхода из строя аварийного пожарного насоса тушение пожара не может быть проведено. Своевременное действие экипажа, представленное в качестве родительского узла «самостоятельная борьба с пожаром». На рисунке представлены родительские узлы ручного подавления в модели Байеса.

Отказ системы пенного пожаротушения и родительские узлы

Система пены высокого давления введена в качестве барьера для тушения пожара в машинном отделении. Эта стационарная система используется для интенсивного тушения пожара. Система активизируется вручную или автоматически для выпуска пены в специально отведенном месте при обнаружении пожара. Поэтому, если пожар остается незамеченным, система также остается отключенной.

Обязательство по использованию стационарной системы пожаротушения с поправками, внесенными в СОЛАС в 2002 году. Судна, построенные до июля 2002 года, не были обязаны иметь систему пенного пожаротушения высокого давления. Соблюдение новых правил определяет, установлена ли на борту судна система высокого расширения или нет. На рисунке представлено соотношение системы пены высокого давления в качестве барьера и родительских узлов этого барьера в модели Байеса.



Рис. 10. Возможные отказы при тушении

Сплинкерная система/система водяного тумана и родительские узлы в модели

Система водяного тумана представляет собой стационарную систему пожаротушения, которая помимо охлаждающего эффекта вытесняет кислород в помещении и вызывает тушение пожара.

Система активируется автоматически/вручную при обнаружении пожара. Подобно системе пены с высоким расширением, использование этой системы было введено в действие после 2002 года в новой поправке к SOLAS. Таким образом соблюдение новых правил определяет оборудовано ли судно стационарной системой пожаротушения (Nurper-mist) или нет.

Неконтролируемый пожар в машинном отделении и основные факторы

Неконтролируемый пожар является конечным узлом модели Байеса. Такой пожар в машинном отделении возникает, когда в отсеке начинается пожар и барьеры не могут подавить огонь.

На рисунке 11 представлены непосредственные факторы, способствующие возникновению

неконтролируемого пожара в предлагаемой модели Байеса для пожара в машинном отделении.



Рис. 11. Факторы неконтролируемого пожара в МО

Тип судна

Как обсуждалось ранее, тип судна представлен в качестве родительского узла культуры безопасности. Этот фактор представлен в качестве узла принятия решений в модели. Узел состояний принятия решений получает дискретные значения (в данном случае это типы судов, такие как танкер, сухогруз и т.д.). Вместо этого фактор типа судна может быть проанализирован в виде случайного узла в модели. Для количественной оценки типа судна как случайного узла необходимо проанализировать данные AIS, чтобы рассчитать, из всех судов, которые плавают в определенном регионе за один год, какая доля/процент из них приходится на какой-либо конкретный тип судна. (Танкер или пассажирское судно, например).

Судно в плавании или остановлено

Состояние движения судна определяет, работают или нет некоторые механизмы, такие как главный двигатель судна. Этот узел может быть количественно оценен путем анализа данных AIS. Для количественной оценки этого фактора используются данные АИС. Продолжительность плавания судов в выбранном регионе (норвежские воды) в течение всего времени нахождения судов в этом регионе — это цифра, которую можно рассчитать с помощью анализа данных AIS.

Модель BBN для неконтролируемого пожара в машинном отделении

Учитывая все влияющие факторы и взаимосвязь между ними, модель для неконтролируемого пожара разработана на рисунке 12. Список узлов и родительских узлов и соответствующие вероятности, и ссылки на назначенные данные представлены также на рисунке 12.

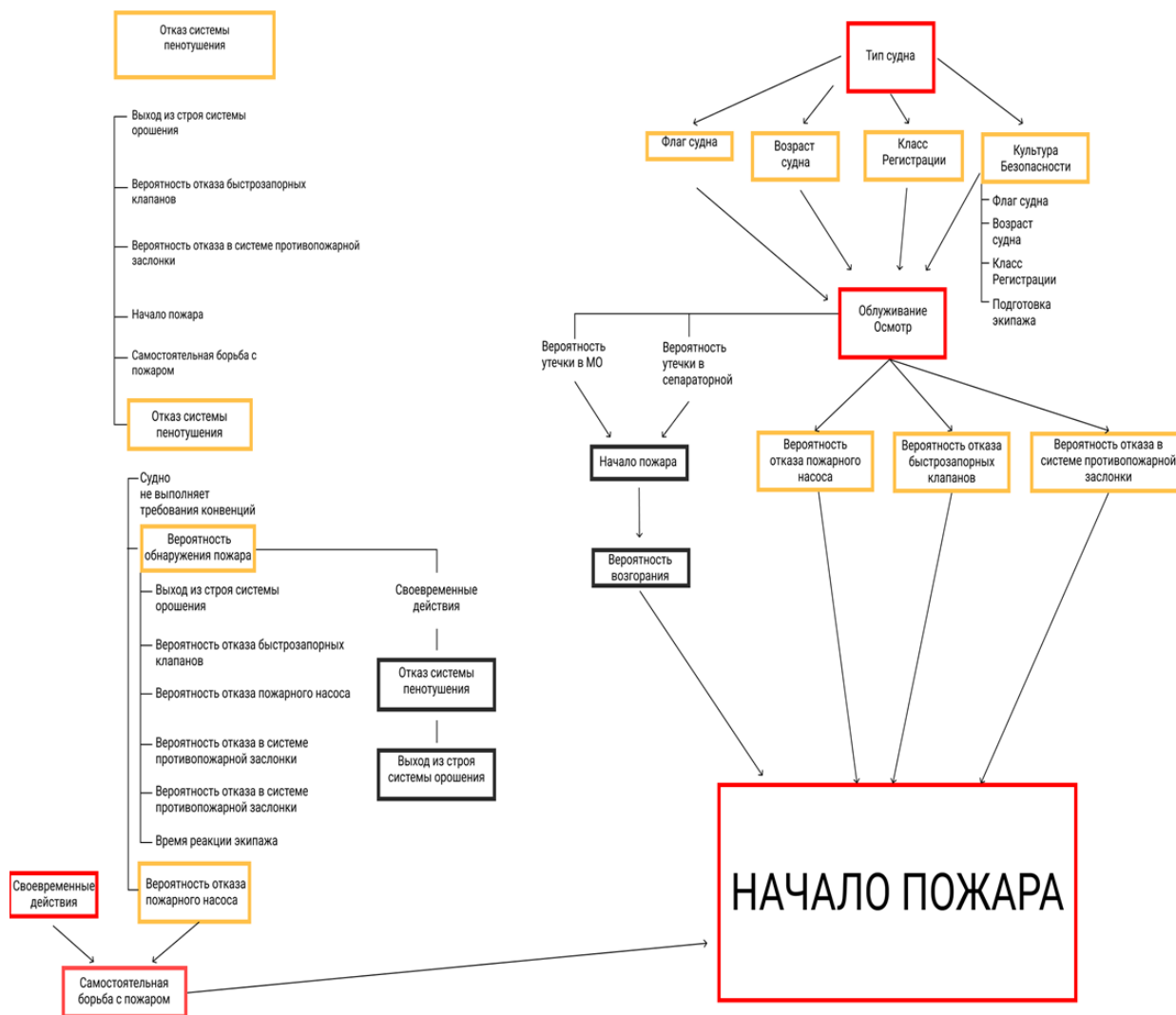


Рис. 12. модель Байеса

Вывод

Благодаря проделанной работе о «возникновении пожара на судне», можно сделать вывод о том, что пожары на судах представляют большую опасность. Несмотря на улучшение правил как в эксплуатации, так и в конструкции судов, по-прежнему частота возникновения пожаров на судах (в машинном отделении) является значительной. Пересмотр международных стандартов был основан на реактивном подходе, а не на упреждающем подходе. Обзор литературы показал, что в последние годы пожар в машинном отделении не был предметом исследований. Публикация научных статей под названием "Пожар в машинном отделении" не дали должного эффекта, так как в содержании статей не рассматриваются факторы, влияющие на риск, или моделирование риска неконтролируемого пожара в машинном отделении

судна. Выявление факторов, влияющих на неконтролируемый пожар в машинном отделении, и разработка упреждающей модели риска могут помочь лучше понять и проанализировать пожар в машинном отделении судов, что, в свою очередь, может привести к соответствующему обновлению стандартов и правил. Модель Байеса в этом исследовании является основным аспектом для идентификации факторов. В модели было соответствие общим особенностям стандартного машинного отделения. Поэтому модель может быть использована для анализа пожара в машинном отделении судов в любом регионе мира. В этом отчете факторы, влияющие на риск, связанные с неконтролируемым пожаром в машинном отделении, определены для построения модели риска с использованием Байесовских сетей.

Литература

1. Abhulimen, Kingsley E, and Alfred A Susu. 2004. Liquid pipeline leak detection system: model development and numerical simulation. Chemical Engineering Journal
2. Akhtar, Muhammad Juned, and Ingrid Bouwer Utne. 2014. Human fatigue's effect on the riskof maritime groundings – A Bayesian Network modeling approach. Safety Science 62

3. Anantharaman, Mohan, Faisal Khan, Vikram Garaniya, and Barrie Lewarn. 2015. Reliability of fuel oil system components versus main propulsion engine: An impact assessment study, Safety of Marine Transport: Marine navigation and safety of sea transportation. Taylor & Francis Group, London, UK, CRC Press/Balkema, A Weinrit & T Neumann (ed), PO Box 11320, 2301 EH Leiden, The Netherlands, pp. ISBN 978-1-138-02859-3 175-180
4. IMCA. 2003. Fires in Machinery Spaces on DP Vessels. final report, The International Marine Contractors Association.
5. IMO. 2006. Goal-based new ship construction standards. Final report, Nagasaki, Japan: International Maritime Organization, Maritime Safety Committee, 81st session, Agenda item 6.
6. IMO. 2004. Performance testing and approval standards for fire safety systems. Final Report, Report of the correspondence group Submitted by the United States: INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, SUB-COMMITTEE ON FIRE PROTECTION, 49th session, Agenda item 4.
7. Summary of SOLAS Chapter II-2 (IMO official website). 3 15. Accessed 3 15, 2016. <http://www.imo.org/en/OurWork/Safety/FireProtection/Pages/Prevention.aspx>
8. А.И. Епихин, Е.В. Хекерт, М.А. Модина Анализ безопасности безэкипажных судов на основе структуры модели риска с использованием сети байеса. Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-4(52). С. 38-46. DOI 10.37220/MIT.2021.52.2.067. EDN ODSQOM.
9. А.И. Епихин, М.А. Модина Проблемы внедрения безэкипажных судов на основе статистических исследований аварийных ситуаций и потерь судов. Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 3-1(53). С. 77-82. DOI 10.37220/MIT.2021.53.3.010. EDN IKWJXK.
10. S.I. Kondratyev, A.I. Epikhin, S.O. Malakhov A diagnostic system of an intelligent component based on Bayesian accurate inference networks. Journal of Physics: Conference Series, Novosibirsk, Novosibirsk, 2021. P. 012022. DOI 10.1088/1742-6596/2032/1/012022. EDN VGBGQW.
11. А.И. Епихин, Е.В. Хекерт, М.А. Модина Анализ безопасности безэкипажных судов на основе структуры модели риска с использованием сети байеса. Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-4(52). С. 38-46. DOI 10.37220/MIT.2021.52.2.067. EDN ODSQOM.

References

1. Abhulimen, Kingsley E, and Alfred A Susu. 2004. Liquid pipeline leak detection system: model development and numerical simulation. Chemical Engineering Journal
2. Akhtar, Muhammad Juned, and Ingrid Bouwer Utne. 2014. Human fatigue's effect on the risk of maritime groundings – A Bayesian Network modeling approach. Safety Science 62
3. Anantharaman, Mohan, Faisal Khan, Vikram Garaniya, and Barrie Lewarn. 2015. Reliability of fuel oil system components versus main propulsion engine: An impact assessment study, Safety of Marine Transport: Marine navigation and safety of sea transportation. Taylor & Francis Group, London, UK, CRC Press/Balkema, A Weinrit & T Neumann (ed), PO Box 11320, 2301 EH Leiden, The Netherlands, pp. ISBN 978-1-138-02859-3 175-180
4. IMCA. 2003. Fires in Machinery Spaces on DP Vessels. final report, The International Marine Contractors Association.
5. IMO. 2006. Goal-based new ship construction standards. Final report, Nagasaki, Japan: International Maritime Organization, Maritime Safety Committee, 81st session, Agenda item 6.
6. IMO. 2004. Performance testing and approval standards for fire safety systems. Final Report, Report of the correspondence group Submitted by the United States: International Maritime Organization, Sub-Committee On Fire Protection, 49th session, Agenda item 4.
7. Summary of SOLAS Chapter II-2 (IMO official website). 3 15. Accessed 3 15, 2016. <http://www.imo.org/en/OurWork/Safety/FireProtection/Pages/Prevention.aspx>
8. А.И. Епихин, Е.В. Хекерт, М.А. Модина. Анализ безопасности безэкипажных судов на основе структуры модели риска с использованием сети байеса [Analysis of the safety of unmanned ships based on the structure of the risk model using the Bayesian network]. Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-4(52). С. 38-46. DOI 10.37220/MIT.2021.52.2.067. EDN ODSQOM.
9. А.И. Епихин, М.А. Модина. Проблемы внедрения безэкипажных судов на основе статистических исследований аварийных ситуаций и потерь судов [Problems of implementation of unmanned ships based on statistical studies of accidents and losses of ships]. Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 3-1(53). С. 77-82. DOI 10.37220/MIT.2021.53.3.010. EDN IKWJXK.
10. S.I. Kondratyev, A.I. Epikhin, S.O. Malakhov. A diagnostic system of an intelligent component based on Bayesian accurate inference networks [A diagnostic system of an intelligent component based on Bayesian accurate inference networks]. Journal of Physics: Conference Series, Novosibirsk, Novosibirsk, 2021. P. 012022. DOI 10.1088/1742-6596/2032/1/012022. EDN VGBGQW.
11. А.И. Епихин, Е.В. Хекерт, М.А. Модина. Анализ безопасности безэкипажных судов на основе структуры модели риска с использованием сети байеса [Analysis of the safety of unmanned ships based on the structure of the risk model using the Bayesian network]. Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-4(52). С. 38-46. DOI 10.37220/MIT.2021.52.2.067. EDN ODSQOM.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей 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

Alexey I Epikhin Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department "Operation of ship mechanical installations" Admiral Ushakov State Maritime University, 353924, Novorossiysk, Lenin Ave., 93, e-mail: bsmbeton@mail.ru

Никита Евгеньевич Шулика курсант, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93

Nikita E. Shulika, cadet, Admiral Ushakov State Maritime University, 353924, Novorossiysk, Lenin Ave., 93

Никита Алексеевич Поддубный, курсант, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93

Nikita A. Poddubny, cadet, Admiral Ushakov State Maritime University, 353924, Novorossiysk, Lenin Ave., 93

Эдуард Алексеевич Епихин, курсант, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93

Eduard A. Epikhin, cadet, Admiral Ushakov State Maritime University, 353924, Novorossiysk, Lenin Ave., 93

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 08.11.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 27.01.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 31.01.2023.

Научная статья

УДК 656.6.058

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.011>

Расчётная оценка безопасности хранения отработавшего ядерного топлива в приреакторном бассейне выдержки

В.Ю. Каминский¹ Kaminskyvy@yandex.ru, Д.А. Скороходов¹ skorohodda@mail.ru,

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. Разработан алгоритм расчётной оценки охлаждения отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) в бассейне выдержки (БВ) реактора типа ВВЭР с повышенной глубиной выгорания. Алгоритм включает определение изотопного состава топлива ОТВС, оценку остаточного энерговыделения топливных сборок, расчёт температуры, охлаждающей топливо среды, и расчёт температуры поверхности оболочек твэлов, включённых в ОТВС. Данные изотопного состава топлива рассчитываются с использованием программы TDMCC, моделирующей работу реактора ВВЭР, с привлечением библиотеки оцененных ядерных данных ENDF/B-VII.0. По результатам вычислений построены зависимости остаточного энерговыделения от времени нахождения ОТВС в БВ для различных значений начального обогащения и глубины выгорания топлива. В сравнении с данными отраслевого стандарта РБ-093-20, представляющего достаточно узкий диапазон границ начального обогащения топлива, в рамках предлагаемого алгоритма реализован сравнительно полный учёт изотопов в составе ОТВС, что обеспечивает более высокую точность расчётной оценки остаточного энерговыделения. Выполнен расчёт теплоотвода от топливных сборок с повышенной глубиной выгорания в БВ серийного ВВЭР-1000. Показано, что для обеспечения надежного теплоотвода от ОТВС с повышенной глубиной выгорания возможно использование насосов и теплообменников системы расхолаживания БВ серийного ВВЭР-1000.

Ключевые слова: ядерное топливо, обогащение, реактор, выгорание, бассейн выдержки, активность, алгоритм, остаточное энерговыделение, теплоотвод, охлаждение.

Для цитирования: Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Расчётная оценка безопасности хранения отработавшего ядерного топлива в приреакторном бассейне выдержки, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 100—104. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.011

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.011>

Estimated safety assessment of spent nuclear fuel storage in the pre-reactor holding pool

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. An algorithm has been developed for calculating the cooling of spent fuel assemblies (SFAS) in the holding pool (BV) of a VVER-type reactor with an increased burnout depth. The algorithm includes the determination of the isotopic composition of the SFAS fuel, the assessment of the residual energy release of fuel assemblies, the calculation of the temperature of the fuel cooling medium, and the calculation of the surface temperature of the fuel element shells included in the SFAS. The fuel isotope composition data are calculated using the TDMCC program, which simulates the operation of the VVER reactor, using the ENDF/B-VII.0 library of estimated nuclear data. Based on the results of calculations, the dependences of the residual energy release on the time spent by the SFAS in the BV for various values of initial enrichment and the depth of fuel burnout are constructed. In comparison with the data of the industry standard RB-093-20, which represents a fairly narrow range of the boundaries of the initial fuel enrichment, the proposed algorithm implements a relatively complete accounting of isotopes in the composition of SFAS, which provides a higher accuracy of the estimated residual energy release. The calculation of the heat sink from fuel assemblies with an increased burnout depth in the BV of the serial VVER-1000 was performed. It is shown that in order to ensure reliable heat removal from SFAS with an increased burnout depth, it is possible to use pumps and heat exchangers of the BV cooling system of the serial VVER-1000.

Key words: nuclear fuel, enrichment, reactor, burnout, holding pool, activity, algorithm, residual energy release, heat sink, cooling.

For citation: Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov Estimated safety assessment of spent nuclear fuel storage in the pre-reactor holding pool, 2023. № 1 part 1, P. 100—104. DOI:10.37220/MIT.2023.59.1.011

Введение

Бассейн выдержки (БВ) отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) – сооружение, входящее в состав ядерной установки или пункта содержания ядерных материалов. Предназначен для временного хранения ОЯТ под защитным слоем борированной

воды с целью достижения допустимых значений активности и остаточного тепловыделения при последующей транспортировке отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) с территории АЭС [1].

Бассейн выдержки находится в герметичной части реакторного отделения атомной станции,

состоит из нескольких отсеков и соединен перегрузочным каналом с шахтой реактора. ОТВС перемещаются из реактора с помощью перегрузочной машины и устанавливаются в стеллажи бассейна выдержки. ОТВС с выявленными дефектами хранятся в бассейне в герметичных пеналах.

Система охлаждения бассейна выдержки осуществляет отвод остаточных тепловыделений от ядерного топлива; поддерживает номинальный уровень борированной воды в отсеках БВ с размещённым ядерным топливом; обеспечивает требуемое качество воды БВ (при необходимости выполняется очистка воды или вводятся реагенты); реализует радиационную безопасность в помещениях системы.

Охлаждение топлива, размещённого в бассейне, осуществляется как в нормальных, так и в аварийных режимах, кроме режимов с разрывом трубопроводов первого или второго контура в пределах гермооболочки.

При длительном хранении ОТВС температура в бассейне выдержки не должна превышать 50°C. В аварийных режимах эта температура не должна быть больше 70°C.

Уровень воды над головками топливных сборок в каждом из отсеков БВ обеспечивает свободный отвод тепла от ОТВС, а также реализует защиту от радиоактивного излучения топливных сборок, размещённых в бассейне.

В рамках настоящего исследования выполнена оценка возможности безопасного размещения ОТВС с повышенной глубиной выгорания [2] в бассейне выдержки серийного блока ВВЭР-1000 (рис.1).

Общий объём БВ блока с ВВЭР, состоящего из трёх отсеков, составляет около 1160 м³.

Во всех отсеках расположены стеллажи для установки ОТВС. Первый и второй отсеки используются для выдержки отработавшего топлива, третий отсек является запасным для аварийной выгрузки ТВС из активной зоны.

При использовании стеллажей с треугольной решеткой с шагом 400 мм суммарная вместимость БВ составляет 2,5 активных зоны. В случае использования нейтронно-поглощающих материалов в стеллажах (шаг между ОТВС – 300 мм), вместимость составляет 3,8 активных зоны.

Каждый отсек бассейна выдержки имеет насос и теплообменник расхолаживания. В бассейне выдержки может быть размещено 756 ОТВС.

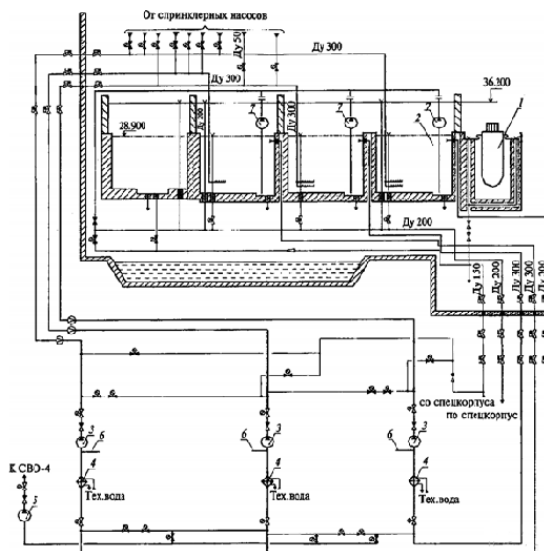


Рис.1. Схема системы расхолаживания бассейна выдержки: 1 – реактор, 2 – бассейн выдержки отработавшего топлива, 3 – насос расхолаживания бассейна выдержки, 4 – теплообменник расхолаживания бассейна выдержки, 5 – насос подачи воды на систему водоочистки (СВО-4), 6 – переключатель, 7 – переносной погружной насос

Алгоритм расчётной оценки теплоотвода отработавшего топлива в БВ

Известно, чем выше начальное обогащение природного урана изотопом ²³⁵U, тем больше глубина выгорания топлива и, тем выше остаточная активность и тепловыделение ОТВС.

Расчет проведен для двух групп ОТВС. Одна группа топливных сборок содержит твэлы из диоксида урана, другая содержит твэги, в которых к диоксиду урана добавлено 3,35% Gd₂O₃. В каждой группе ОТВС находятся топливные сборки с тремя значениями глубины выгорания: 60, 65, 70ГВт сут/тU.

Расчётная оценка выполняется в рамках последовательной реализации следующих этапов алгоритма: определение изотопного состава топлива ОТВС с различной глубиной выгорания после выгрузки из реактора; расчёт остаточного энерговыделения топливных сборок; расчёт температуры охлаждающей среды в БВ и расчёт температуры поверхности твэлов и твэггов.

Определение изотопного состава топлива ОТВС

Данные изотопного состава топлива определены с использованием программы TDMCC, моделирующей работу реактора ВВЭР [3] и библиотеки оцененных ядерных данных ENDF/B-VII.0 [4].

Отечественное программное средство (ПС) TDMCC (Time Dependent Monte Carlo Code) обеспечивает моделирование процессов переноса нейтронов и гамма-квантов в трехмерных средах. В программе реализуется численное решение линейных неоднородных уравнений переноса частиц и фотонов в трехмерной геометрии аналоговыми и неаналоговыми методами Монте-Карло. С помощью TDMCC можно оценивать критичность и ядерную безопасность отдельных тепловыделяющих сборок и, в целом, активных зон реакторов, рассчитывать радиационную безопасность и защиту от излучений, также возможно проводить расчётную оценку выгорания топлива и моделировать топливные циклы реакторных установок. В частности, программа позволяет выполнить расчет кампании реактора с определением изменения нуклидного состава топлива.

Анализ нейтронно-физических характеристик реакторных систем, осуществляемый методом Монте-Карло в рамках вычислительных кодов, требует использования специализированных библиотек ядерных нейтронных данных для вычисления различных нейтронно - физических характеристик., например, библиотеки ENDF/B-VII.0.

Расчёт остаточного энерговыделения ОТВС

После определения изотопного состава топлива остаточное энерговыделение может быть рассчитано как сумма произведения активности изотопа на среднюю величину энерговыделения:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^M \lambda_i N_i(t) E_i, \quad (1)$$

где E_i – энерговыделение i -го изотопа; λ_i – постоянная радиоактивного распада i -го изотопа; $N_i(t)$ – концентрация i -го изотопа в момент времени " t " после остановки реактора.

По результатам вычислений построены зависимости остаточного энерговыделения ОТВС от времени нахождения топливных сборок в БВ для различных значений начального обогащения и глубины выгорания. Пример зависимости приведён на рис. 2.

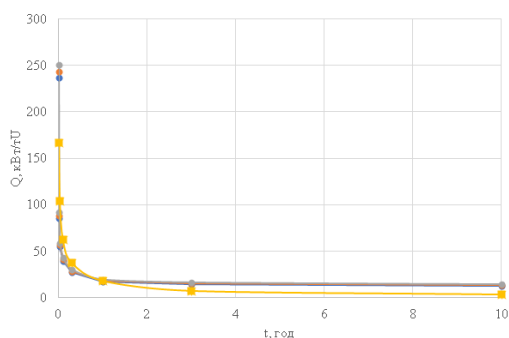


Рис.2. График зависимости остаточного энерговыделения от времени для ТВС с твэлами начального обогащения 4,95% и глубиной выгорания 70 ГВт сут/тУ:

- – остаточное энерговыделение, рассчитанное по формуле (1);
- – остаточное энерговыделение по данным документа РБ-093-20

Проведено сравнение расчётных значений остаточного энерговыделения с данными нормативного документа РБ-093-20 [5].

На начальном этапе выдержки ОТВС результаты расчёта и данные РБ-093-20 близки. По прошествии двух лет выдержки ОТВС в БВ, данные расчёта превышают значения, приведённые РБ-093-20. Это объясняется более полным набором учтённых изотопов в составе ОТВС, полученным по программе TDMCC, а также достаточно узким диапазоном границ начального обогащения топлива, установленным в РБ-093-20 [6].

Расчёт температуры охлаждающей среды после выгрузки ОТВС в БВ

Расчёт теплоотвода выполнен для топливной сборки, размещённой в бассейне выдержки через три дня после остановки реактора (ОТВС с наивысшим энерговыделением: глубина выгорания - 70 ГВт сут/тУ; энерговыделение - 50,6 КВт/ОТВС).

Задаются характеристики системы охлаждения БВ - расход и температура охлаждающей воды на входе в БВ, а также геометрические характеристики ОТВС.

По известным зависимостям определяются: скорость теплоносителя в ячейках стеллажей с ОТВС, удельное энерговыделение твэла, плотность удельного теплового потока по высоте твэла, температуру охлаждающей среды (воды) по высоте твэла.

Результаты расчёта приведены на рис.3.

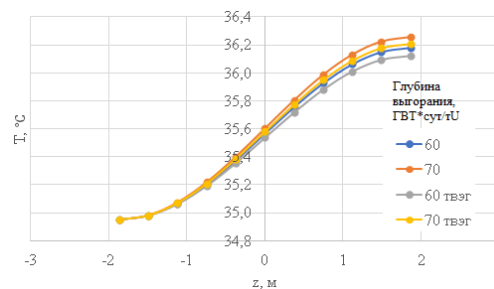


Рис. 3. Зависимость температуры теплоносителя от высоты ОТВС с начальным обогащением 4,95% и различной глубиной выгорания, содержащей твэлы и твэги

Расчёт температуры оболочек твэлов топливных сборок, размещённых в БВ

Рассчитаем распределение температуры по высоте твэлов и твэгов ОТВС, помещённых в БВ.

Температура наружной оболочки тепловыделяющего элемента определяется по формуле:

$$T_{об}^{нар}(z) = T_{ТН}(z) + \frac{q_l(z)}{\pi d_{твэл} \alpha(z)}, \quad (2)$$

где $T_{ТН}(z)$ - температура охлаждающей среды в точке с координатой «z» по высоте твэла (твэга); $q_l(z)$ - удельное линейное энерговыделение по высоте твэла (твэга); $d_{твэл}$ - диаметр твэла (твэга); $\alpha(z)$ - коэффициент теплоотдачи.

Результаты расчёта представлены на рис. 4.

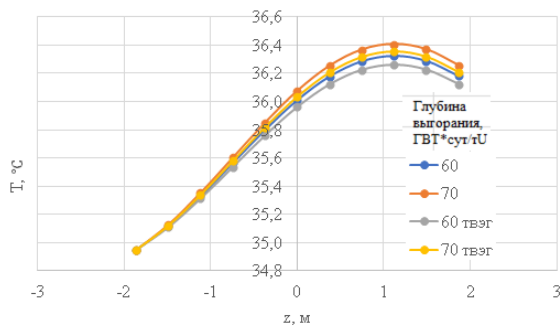


Рис. 4. Зависимость температуры оболочки твэла (твэга) от высоты ОТВС с начальным обогащением 4,95% и различной глубиной выгорания

Заключение

Разработан алгоритм расчётной оценки эффективности охлаждения ОТВС с повышенной глубиной выгорания в бассейне выдержки, включающий определение изотопного состава топлива ОТВС, оценку остаточного энерговыделения топливных сборок, расчёт температуры охлаждающей среды и расчёт температуры поверхности твэлов, входящих в ОТВС.

Проведена расчётная оценка теплоотвода от топливныхборок с повышенной глубиной выгорания в штатном бассейне выдержки серийного ВВЭР-1000.

Для проверки достоверности определения величины остаточного энерговыделения, полученные расчётные оценки по ОТВС сравнивались с данными нормативного документа РБ-093-20. Сравнение показало, что на начальном

этапе, до 1,5-2 лет выдержки, значения остаточного энерговыделения практически совпадают. При большем времени выдержки ОТВС в БВ значения отличаются. Например, для ОТВС с начальным обогащением 4,95% и глубиной выгорания 70 ГВт*сут/тУ, значение остаточного энерговыделения топлива через 10 лет выдержки составляет 8,1 кВт/тУ. Подобная оценка в РБ-093-20 позволяет получить 2,75 кВт/тУ. С учётом ограничений применения РБ-093-20 для случаев выгрузки в бассейн ОТВС с глубокой выгоранием, следует признать более высокой точность расчётной оценки остаточного энерговыделения в рамках разработанного алгоритма. Итак, в результате расчёта остаточное энерговыделение ОТВС с максимальной глубиной выгорания составило $Q_{4,95\%} = 8,1 \text{ кВт/тУ}$ и $Q_{4,95\% \text{ твэг}} = 8,4 \text{ кВт/тУ}$.

Для транспортировки ОТВС к месту переработки или захоронения требуется, чтобы величина остаточного энерговыделения не превышала 4 кВт/тУ [7]. Таким образом, необходимо увеличить время выдержки в БВ отработавших тепловыделяющихборок с повышенной глубиной выгорания.

Приведённая в работе расчётная оценка охлаждения ОТВС показала, что температура оболочки твэлов не превышает 36,5 °C, что позволяет предположить, что для обеспечения надежного теплоотвода от ОТВС с повышенной глубиной выгорания возможно использование насосов и теплообменников системы расхолаживания бассейна выдержки серийного ВВЭР-1000.

Литература

1. НП–061–05. Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергетики. ФС по экологическому, технологическому и атомному надзору. М., 2005.
2. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Волошин К.И. Безопасное хранение отработавшего ядерного топлива // В сборнике: Транспорт России: проблемы и перспективы – 2020. Материалы Юбилейной Международной научно–практической конференции. Санкт-Петербург, 2020. С. 239-243.
3. Свидетельство о госрегистрации № 2010614412. РФ. Программа TDMCC (Time Dependent Monte Carlo Code) / Житник А. К., Рослов В. И., Семенова Т. В. и др.; ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ».
4. ENDF-6 Formats Manual Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data Files ENDF/B-VI and ENDF/B-VII, M. Herman and A. Trkov - National Nuclear Data Center Brookhaven National Laboratory Upton, NY – 2010 – 392 p.
5. РБ-093-20. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива водо-водяных энергетических реакторов и реакторов большой мощности канальных. ФС по экологическому, технологическому и атомному надзору. М., 2020. 99с.
6. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Расчётная оценка безопасности транспортировки отработавшего ядерного топлива // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4-1 (58). С. 162-169.
7. 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. NP–061–05. Pravila bezopasnosti pri hranenii i transportirovanii yadernogo topliva na ob"ektah ispol'zovaniya atomnoj energetiki [Safety rules for the storage and transportation of nuclear fuel at nuclear power facilities]. FS po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru. M., 2005.
2. Kaminsky V.Yu., Skorokhodov D.A., Voloshin K.I. Bezopasnoe hranenie otrabotavshego yadernogo topliva [Safe storage of spent nuclear fuel] // V sbornike: Transport Rossii: problemy i perspektivy – 2020. Materialy YUbilejnoj Mezhdunarodnoj nauchno–prakticheskoj konferencii. Sankt-Peterburg, 2020. pp. 239-243.
3. Svidetel'stvo o gosregistracii № 2010614412. RF. Programma TDMCC (Time Dependent Monte Carlo Code) [Certificate of state registration No. 2010614412. RF. The TDM program (Time Dependent Monte Carlo Code)] / Zhitnik A. K., Roslov V. I., Semenova T. V. i dr.; FGUP «RFYAC VNIIEF».

4. ENDF-6 Formats Manual Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data Files ENDF/B-VI and ENDF/B-VII, M. Herman and A. Trkov - National Nuclear Data Center Brookhaven National Laboratory Upton, NY., 2010. 392 p.
5. RB-093-20. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoj energii. Radiacionnye i teplofizicheskie harakteristiki otrabotavshogo yadernogo topliva vodo-vodyanyh energeticheskikh reaktorov i reaktorov bol'shoj moshchnosti kanal'nyh [Safety Guidelines for the use of Atomic Energy. Radiation and thermophysical characteristics of spent nuclear fuel of water-water power reactors and high-power channel reactors]. FS po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru. M., 2020. 99 p.
6. Kaminsky V.Yu., Skorokhodov D.A. Raschyotnaya ocenka bezopasnosti transportirovki otrabotavshogo yadernogo topliva [Estimated safety assessment of spent nuclear fuel transportation] // Morskije intellektual'nye tekhnologii. 2022. № 4-1 (58). pp. 162-169.
7. Kaminsky V.Yu., Skorokhodov 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 12.01.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.01.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 29.01.2023.

Научная статья

УДК 629.12.001.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.012>

Уточненные зависимости для определения бросовой теплоты судового высокофорсированного дизеля

М.С. Дрозд¹ drozd.mikhail@rambler.ru Г.П. Кича¹ kicha@msun.ru

¹Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского

Аннотация. Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов судовой энергетической установки (СЭУ) за счет утилизации располагаемой (бросовой) теплоты судового дизеля является актуальным направлением развития морского транспорта. Одним из возможных путей решения этой задачи является совершенствование методов и средств подсчета теплового баланса судовых дизелей. Предложены эмпирические уравнения и регрессионные зависимости, которые позволят с высокой точностью определять составляющие теплового баланса судовых высокофорсированных дизелей при любых нагрузках и в различных условиях эксплуатации. Уравнения также учитывают комплексное влияние температуры окружающей среды, развиваемой мощности и режимов работы дизеля на величину его бросовой теплоты. Цель расчетно-экспериментального анализа состояла в уточнении зависимости для определения составляющих теплового баланса судового высокофорсированного дизеля и величины запасов вторичных энергоресурсов. Практическая ценность рассмотренных уравнений заключается в предельной точности удельных показателей количества бросовой теплоты судового высокофорсированного дизеля, в учете их взаимосвязи с параметрами, характеризующими особенности эксплуатации СЭУ. Границы их высокой достоверности расширены до использования в условиях низких температур (до -30 °С окружающего воздуха). Проведена проверка предлагаемых математических уравнений на адекватность путем сравнения расчетных данных о количестве бросовой теплоты исследуемых судовых высокофорсированных дизелей с паспортными показателями, установленными во время приемо-сдаточных испытаний. Данные, полученные в результате расчетов, целесообразно использовать при проектировании, модернизации и оптимизации СЭУ для повышения её энергетической эффективности.

Ключевые слова: тепловой баланс, утилизация вторичных энергоресурсов, двигатели внутреннего сгорания, энергетическая эффективность.

Для цитирования: Кича Г.П., Дрозд М.С. Уточненные зависимости для определения бросовой теплоты судового высокофорсированного дизеля, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 105—111. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.012

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.012>

Updated dependencies for determination of heat loss of ship's high-powered diesel engine

Mikhail S. Drozd¹ drozd.mikhail@rambler.ru Gennadiy P. Kicha¹ kicha@msun.ru

¹Maritime state university named Admiral G. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. Increase of efficiency of use of fuel and energy resources of ship power plant (SPP) due to utilization of available (waste) heat of ship diesel is the actual direction of development of sea transport. One possible way to solve this problem is to improve the methods and means of calculating the thermal balance of ship diesels. Empirical equations and regression dependencies are proposed, which will make it possible to determine with high accuracy the components of the thermal balance of ship highly sourced diesel engines under any loads and under various operating conditions. The equations also take into account the complex influence of the ambient temperature, the developed power and the operating modes of the diesel engine on the value of its exhaust heat. The purpose of the calculation and experimental analysis was to clarify the dependence to determine the components of the thermal balance of the ship's highly sourced diesel engine and the value of the reserves of secondary energy resources. The practical value of the considered equations lies in the maximum accuracy of the specific indicators of the amount of waste heat of the ship's highly powered diesel engine, in taking into account their relationship with the parameters characterizing the peculiarities of the SPP operation. The boundaries of their high reliability have been expanded to use in low temperature conditions (up to -30 °C of ambient air). The proposed mathematical equations were checked for adequacy by comparing the calculated data on the amount of waste heat of the studied ship high-sourced diesel engines with the passport indicators established during acceptance tests. The data obtained as a result of calculations should be used in the design, modernization and optimization of the SPP to increase its energy efficiency.

Key words: heat balance, recycling of secondary energy resources, internal combustion engines, energy efficiency.

For citation: Gennadiy P. Kicha, Mikhail S. Drozd Updated dependencies for determination of heat loss of ship's high-powered diesel engine, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 105—111. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.012

Введение

Снижение расхода топлива судовой энергетической установки (СЭУ) за счет использования систем глубокой утилизации бросовой теплоты судового дизеля является одним из возможных способов повышения энергетической эффективности морских транспортных судов. Законодательные требования к выбросам диоксида углерода CO₂ (индексы EEDI, EEOI), установленные Резолюцией ИМО MERC.203 (62) по техническим мерам сокращения выбросов парниковых газов с судов, вынуждают судовладельцев искать новые решения и совершенствовать известные способы снижения расхода топлива [10]. Поскольку наибольший расход топлива связан с работой дизелей в составе СЭУ, эффективный КПД (η_e) которых достигает не более 53 % и не изменяется десятилетиями, в судостроении произошел переход от повышения η_e к комплексной оценке всех аспектов, влияющих на распределение потоков теплоты, выделяющейся при сгорании топлива, и эффективность её утилизации в СЭУ [5]. Одним из наиболее распространенных решений, связанных с рациональным расходом топливно-энергетических ресурсов в СЭУ, можно выделить полезное использование вторичных энергоресурсов (ВЭР) судовых дизелей, а именно, теплоты отработавших газов (ОГ), наддувочного воздуха (НВ), охлаждающей жидкости и смазочного масла.

Оценка показателей энергетической (тепловой) эффективности СЭУ, прежде всего, начинается с составления уравнения внешнего теплового баланса главного двигателя (ГД):

$$Q_T = Q_e + Q_{ог} + Q_{охл} + Q_{нв} + Q_M + Q_{ост}, \quad (1)$$

где Q_T – теплота, выделившаяся при сгорании топлива; Q_e – теплота, эквивалентная эффективной работе; $Q_{ог}$ – теплота, отведенная с ОГ на выходе из турбокомпрессора; $Q_{охл}$ – теплота, отведенная с водой охлаждающей втулки цилиндра; $Q_{нв}$ – теплота, отведенная в охладителе НВ; Q_M – теплота, отведенная со смазочным маслом; $Q_{ост}$ – остаточный член теплового баланса.

Для расчета количества теплоты, отводимой с потоком теплоносителя, используется известная термодинамическая формула:

$$Q = Gc\Delta T, \quad (2)$$

где G – расход теплоносителя, кг/с; c – удельная теплоемкость теплоносителя, кДж/(кг·К); ΔT – перепад температуры теплоносителя, К.

При сравнении особенностей распределения потоков теплоты различных типов дизелей используют относительный тепловой баланс:

$$1 = q_e + q_{ог} + q_{охл} + q_{нв} + q_M + q_{ост}. \quad (3)$$

Каждая составляющая уравнения (3) является относительной долей тех или иных затрат энергии топлива, знание о которых является основой для установления оптимальных, с точки зрения энергоэффективности СЭУ, режимов работы ГД и вспомогательного энергетического оборудования.

Теплота, эффективно преобразованная в работу, может быть, определена по формуле [9]:

$$q_e = \eta_e = \frac{3600}{Q_p^H g_e} = \frac{3600 N_e}{Q_p^H G_T}, \quad (4)$$

где g_e – удельный расход топлива, кг/(кВт·ч); Q_p^H – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг; N_e – эффективная мощность ГД, кВт; G_T – часовой расход топлива, кг/ч.

Наиболее точным методом для нахождения составляющих теплового баланса судовых дизелей является получение экспериментальных данных о массовых расходах и температуре теплоносителей посредством современных измерительных приборов, способных определять точные значения искомого составляющих, что в условиях эксплуатации судна не всегда выполнимо, в том числе из-за сложности и дороговизны экспериментальных исследований [6].

Противоположным решением для нахождения составляющих теплового баланса может выступать использование расчетных методик, что в значительной мере требует повышенной точности в определении температур и массовых расходов теплоносителей и исключает необходимость проведения измерений приборами и обращения к данным таблиц и диаграмм (в случае их наличия).

Для решения поставленной задачи, использовали авторские наработки и математические зависимости, полученные в результате исследований судовых дизелей фирм Wartsila Engines, MAN Energy Solution и MaK-Caterpillar [2, 4, 11]. Предложенные уравнения характеризуют искомые составляющие теплового баланса в зависимости от конструктивных особенностей отдельно взятого судового дизеля и различных условий его эксплуатации и нагрузок.

1. Теплота, теряемая с отработанными газами

Абсолютная теплота, отводимая с ОГ, определяется как разность энтальпий между поступающими в компрессор воздухом и газами на выходе из турбины [3]:

$$Q_{ог} = c_{p_{ог}} (G_{нв} + G_T) (T_{ог} - T_{окр}); \quad (5)$$

$$G_{нв} = \frac{28,95\alpha\varphi_a L_0 g_e N_e}{3600}, \quad (6)$$

$$G_T = \frac{g_e N_e}{3600}, \quad (7)$$

где $(G_{нв} + G_T)$ – сумма массового расхода наддувочного воздуха и топлива ГД, кг/с; $(T_{ог} - T_{окр})$ – разность температур ОГ после турбины и воздуха перед компрессором, К; α – коэффициент избытка воздуха при сгорании; φ_a – коэффициент продувки; L_0 – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания, кмоль/кг.

Особенностью уравнений (5), (6) является наличие в их составе переменных N_e , g_e , $T_{ог}$, $T_{окр}$, которые позволяют устанавливать теплоту, теряемую с ОГ не только на номинальном, но и для переменных режимов работы ГД.

Коэффициенты избытка воздуха при сгорании и продувке можно определить через эмпирическую зависимость [8]:

$$\alpha = 9,5 \sqrt{\frac{Dp_{me}(1,0+0,1S/D)}{(1,0+10D)(1,0+1,25p_{me})}}, \quad (8)$$

$$\varphi_a = 1,085 + 0,375p_K, \quad (9)$$

где S/D – отношение хода поршня к диаметру цилиндра; p_{me} – среднее эффективное давление дизеля, МПа; $p_k = \frac{p_{me}}{6,5}$ – давление наддува, МПа.

Температура ОГ, как правило, устанавливают по показаниям штатных измерительных приборов либо рассчитывают теоретически с помощью уравнения множественной линейной регрессии [3]:

$$T_{ог} = 227,1 + 92,5p_{me} + 26,3c_m, \quad (10)$$

где c_m – средняя скорость поршня, м/с.

Как видно из уравнения (10), температура ОГ – параметр, который характеризует тепловое и теплонапряженное состояние дизеля, зависит от показателей его форсированности (p_{me} , c_m) и вполне может служить для оценки тепловых потерь, отводимых ОГ.

Фирмой MAN Energy Solution была разработана методика, позволяющая определить массовый расход и температуру ОГ при различных параметрах окружающей среды и любых режимов нагрузки малооборотных дизелей. Уравнение, предложенное MAN Energy Solution, записывается в следующем виде [11]:

$$G_{ог} = G_{огн} \frac{N_i}{N_n} \cdot \frac{\Delta G_{ог_i}}{100} \left(1 + \frac{\Delta G_{окр}}{100}\right) \left(1 + \frac{\Delta G_{N_i}}{100}\right) \times \frac{\bar{N}}{100} \left(1 + \frac{\Delta G_{TCS}}{100}\right); \quad (11)$$

$$t_{ог} = t_{огн} + \Delta t_{ог_i} + \Delta t_{окр} + \Delta t_{N_i} + \Delta t_{TCS}, \quad (12)$$

где $\bar{N} = \frac{N_i}{N_n} 100\%$ – относительная нагрузка дизеля (отношение i -ой нагрузки и номинальной); $G_{огн}$ – расход ОГ при номинальной нагрузке дизеля, кг/ч; $t_{огн}$ – температура ОГ при номинальной нагрузке дизеля, °С; $\Delta G_{ог_i}$, $\Delta G_{окр}$, ΔG_{N_i} , ΔG_{TCS} – поправки к выбору i -ой нагрузки дизеля (на влияние внешних условий, на влияние частичных нагрузок, на наличие турбокомпаундной системы соответственно), %.

Поправки массовых расходов $\Delta G_{ог_i}$ и температур $\Delta t_{ог_i}$ на выбор i -ой нагрузки дизеля определяются следующими уравнениями [2]:

$$\Delta G_{ог_i} = -14,94 \ln(\bar{n}) + 14,94 \ln(\bar{N}) + 100; \quad (13)$$

$$\Delta t_{ог_i} = 35,5 \ln(\bar{n}) + 14,9 \ln(\bar{N}) - 232,4, \quad (14)$$

где $\bar{n} = \frac{n_i}{n} 100\%$ – относительная частота вращения дизеля.

Поправки массовых расходов $\Delta G_{окр}$ и температур $\Delta t_{окр}$ на влияние окружающей среды можно рассчитать посредством уравнений [2]:

$$\Delta G_{окр} = -0,41(t_{окр} - 25) - 0,03(p_{окр} - 1000) + 0,19(t_{нв} - 25) - 0,011(p_{ог_i} - 300); \quad (15)$$

$$\Delta t_{окр} = 1,6(t_{окр} - 25) + 0,01(p_{окр} - 1000) + 0,1(t_{нв} - 25) + 0,05(\Delta p_{ог_i} - 300), \quad (16)$$

где $t_{нв}$ – температура воды в охладителе наддувочного воздуха, °С; $\Delta p_{ог_i} = \Delta p_{огн} \bar{N}$ – противодавление ОГ, соответствующее i -ой нагрузке дизеля, мм H₂O; $\Delta p_{огн}$ – противодавление ОГ при номинальной нагрузке дизеля, мм H₂O.

Поправки массовых расходов $\Delta G_{чн}$ и температур $\Delta t_{чн}$ на влияние частичных нагрузок устанавливаются на основании следующих уравнений [2]:

– для дизелей, работающих на винт с фиксированным шагом (ВФШ)

$$\Delta G_{чн} = 0,0055(\bar{N})^2 - 1,55\bar{N} + 60, \quad (17)$$

$$\Delta t_{чн} = 0,0055(\bar{N})^2 - 0,72\bar{N} + 22; \quad (18)$$

– для дизелей, работающих на винт с регулируемым шагом (ВРШ)

$$\Delta G_{чн} = 0,0055(\bar{N})^2 - 1,22\bar{N} + 67; \quad (19)$$

$$\Delta t_{чн} = 0,0043(\bar{N})^2 - 0,63\bar{N} + 20. \quad (20)$$

Поправки массовых расходов ΔG_{TCS} и температур $\Delta t_{TCS} = 0$ на наличие турбокомпаундной системы:

$$\Delta G_{TCS} = c - \frac{N_{TCS}}{N_i} 100, \quad (21)$$

где N_{TCS} – нагрузка турбокомпаундной системы, кВт; $c = 3,4$ – для дизелей с $D = 800 \div 900$ мм; $c = 0$ – для дизелей с $D = 500 \div 700$ мм.

Приведённые уравнения могут быть уточнены для их распространения на иные группы дизелей.

2. Теплота, теряемая при охлаждении цилиндров

Потери теплоты при охлаждении цилиндропоршневой группы (ЦПГ) дизеля определяются без учета теплоты, поступающей из окружающей среды, посредством следующих термодинамических формул [1]:

$$Q_{охл} = G_b c_b (T_{в2} - T_{в1}) = G_b c_b T_{в1} \left(\frac{T_{в2}}{T_{в1}} - 1\right), \quad (22)$$

$$Q_{охл} = q_{охл} Q_p^H G_T, \quad (23)$$

где G_b – расход воды, охлаждающей дизель, кг/с; $T_{в1}$ и $T_{в2}$ – температура воды на выходе и входе в дизель соответственно, К.

Для определения относительной теплоты, отводимой при охлаждении ЦПГ, можно использовать универсальные зависимости [2], позволяющие определять $q_{охл}$ в интервале нагрузок от 50 до 100 % номинальной мощности ГД и температуре окружающей среды от –30 до +45 °С.

Малооборотный дизель:

– при работе по винтовой характеристике

$$q_{охл} = k_t k_{k_b} \exp(1,26 - 0,08 \ln \bar{n} + 0,77 \ln \bar{N}); \quad (24)$$

– при работе по нагрузочной характеристике:

$$q_{охл} = k_t k_{k_n} \exp(1,26 - 0,08 \ln \bar{n} + 0,81 \ln \bar{N}), \quad (25)$$

где $k_t = 0,995 + t_{окр} 10^{-3}$ – коэффициент, учитывающий влияние на процесс $t_{окр}$; $k_{k_b} = 0,818 + 1,82N 10^{-3}$, $k_{k_n} = 0,788 + 2,15\bar{N} 10^{-3}$ – коэффициент влияния дизеля (изменение \bar{N}) при работе по винтовой или нагрузочной характеристике.

Среднеоборотный дизель:

– при работе по винтовой характеристике

$$q_{охл} = k_t k_{k_b} \exp(1,26 - 0,08 \ln \bar{n} + 0,81 \ln \bar{N}); \quad (26)$$

– при работе по нагрузочной характеристике:

$$q_{охл} = k_t k_{k_n} \exp(1,42 - 0,08 \ln \bar{n} + 0,77 \ln \bar{N}), \quad (27)$$

где $k_{k_b} = 0,795 + 2,05\bar{N}10^{-3}$, $k_{k_n} = 0,745 + 2,55\bar{N}10^{-3}$ – коэффициент влияния дизеля (изменение \bar{N}) при работе по винтовой или нагрузочной характеристике.

3. Теплота, теряемая при охлаждении наддувочного воздуха

Потери теплоты, отводимой с охлаждением наддувочного воздуха, определяются по формуле:

$$Q_{нв} = G_{нв} c_{p_b} (T_{нв_1} - T_{нв_2}), \quad (28)$$

$$Q_{нв} = q_{охл} Q_p^H G_T, \quad (29)$$

где $T_{нв_1} - T_{нв_2}$ – разность температуры воздуха на вход/выход из охладителя НВ соответственно, К.

Уравнения (6) и (28) устанавливают связь величины потерь теплоты, отводимой с охлаждением НВ, с показателями режима нагрузки (g_e, \bar{N}) и уровня его форсированности (α), что позволяет рассчитывать $Q_{нв}$ при номинальном и переменном режимах работы ГД.

Относительные потери теплоты, отводимой с охлаждением НВ, в зависимости от условий работы ГД, можно определить посредством следующих эмпирических уравнений [2].

Малооборотный дизель:

– при работе по винтовой характеристике

$$q_{охл} = k_t k_{k_b} \exp(0,1 - 0,85 \ln \bar{n} + 1,83 \ln \bar{N}); \quad (30)$$

– при работе по нагрузочной характеристике:

$$q_{охл} = k_t k_{k_n} \exp(0,1 - 0,85 \ln \bar{n} + 1,83 \ln \bar{N}), \quad (31)$$

где $k_t = 0,995 + t_{окр} 10^{-3}$ – коэффициент, учитывающий влияние на процесс $t_{окр}$; $k_{k_b} = 0,818 + 1,82\bar{N}10^{-3}$, $k_{k_n} = 0,785 + 2,15\bar{N}10^{-3}$ – коэффициент влияния дизеля (изменение \bar{N}) при работе по винтовой или нагрузочной характеристике.

Среднеоборотный дизель:

– при работе по винтовой характеристике

$$q_{охл} = k_t k_{k_b} \exp(0,26 - 0,85 \ln \bar{n} + 1,8 \ln \bar{N}); \quad (32)$$

– при работе по нагрузочной характеристике:

$$q_{охл} = k_t k_{k_n} \exp(0,26 - 0,85 \ln \bar{n} + 1,8 \ln \bar{N}), \quad (33)$$

где $k_{k_b} = 0,795 + 2,05\bar{N}10^{-3}$, $k_{k_n} = 0,745 + 2,55\bar{N}10^{-3}$ – коэффициент влияния дизеля (изменение \bar{N}) при работе по винтовой или нагрузочной характеристике.

Необходимо отметить, что в приведенных зависимостях, коэффициенты k_t и k_k учитывают влияние характера работы ГД и температуры воздуха на относительные величины тепла, теряемого при охлаждении НВ и уносимого с охлаждающей водой. Указанное обстоятельство позволяет определять количество бросовой теплоты при различных условиях работы и нагрузки ГД.

4. Теплота, теряемая при охлаждении смазочного масла

Абсолютное значение теплоты, отводимой в смазочное масло ГД, определяется по известной формуле:

$$Q_M = G_M c_M (T_{M_1} - T_{M_2}), \quad (34)$$

$$Q_M = q_M Q_p^H G_T, \text{ кВт}, \quad (35)$$

где G_M – секундный расход смазочного масла, кг/с; T_{M_1} и T_{M_2} – температура смазочного масла на выходе и входе в дизель соответственно, К.

Величина потерь теплоты, отводимой в смазочное масло, определяется в первую очередь нагревом масла, который происходит при смазке и охлаждении поршней ГД, поэтому определение потерь со смазочным маслом может основываться на использовании показателя теплонапряженности поршня [7].

Для получения значений относительной теплоты, теряемой в смазочное масло ГД, можно использовать регрессивную зависимость [4, 7]:

$$q_M = \frac{1,75 \sqrt[3]{K_{r_k}}}{100}, \quad (36)$$

$$K_{r_k} = 5,85 \left(\frac{D}{\eta_n p_k} \right)^{0,38} c_m^{0,5} \left(p_{me} g_e \frac{T_{нв_1}}{293} \right)^{0,88}, \quad (37)$$

где K_{r_k} – критерий Костина; η_n – коэффициент наполнения; p_k – давление наддува, МПа.

Приведенный критерий удобен тем, что он учитывает как режим нагрузки ГД (g_e, c_m), так и показатели его форсированности (p_{me}, p_k).

5. Анализ расчетных и паспортных данных о бросовой теплоте современных дизелей

Одной из задач, решаемой в рамках настоящей статьи, является сравнение паспортных данных о составляющих теплового баланса судовых дизелей, установленных во время приемо-сдаточных испытаний, с расчетными результатами, полученными посредством математических зависимостей, предложенных в настоящей статье и уточняющих методику расчета теплового баланса. Работоспособность и точность предложенных уточненных зависимостей были проверены путем сопоставления результатов расчета с паспортными данными 54-х судовых высокофорсированных дизелей со средним эффективным давлением в диапазоне 2,06–2,73 МПа в условиях окружающей среды, соответствующих стандартам ISO для номинального режима работы [4, 12]. Сопоставление расчетных и паспортных данных судовых дизелей представлено в табл. 1

Таблица 1

Сопоставление расчетных и паспортных данных о составляющих теплового баланса судовых дизелей

		MAN Energy Solution		Wartsila Engines		MAK Caterpillar	
		G45ME	51/60DF	W46DF	W50DF	VM43C	M46DF
$Q_{ог}$, кВт	Расчет	3634–5698	2843–8898	2818–7516	2812–9463	5106–6242	3125–4804
	Паспорт.	3443–5499	3153–9468	2679–7223	2940–10109	5314–6581	3444–5052
	Δ , %	3,6–5,5	6,0–9,8	4,1–5,2	4,4–6,4	3,9–5,2	4,2–4,9
$Q_{охл}$, кВт	Расчет	884–1471	429–1621	849–3058	629–2867	1554–2122	702–1053
	Паспорт.	950–1530	457–1705	812–2944	654–3024	1667–2220	745–1115
	Δ , %	3,7–7,0	4,9–6,1	3,9–4,6	3,8–5,2	4,4–6,8	5,5–5,8
$Q_{онв}$, кВт	Расчет	2392–3877	2326–8353	1525–7061	1422–6084	6088–8193	2407–3556
	Паспорт.	2480–4120	2210–7855	1464–6736	1350–5796	5830–7755	2270–3785
	Δ , %	3,5–5,9	5,2–6,1	4,2–4,8	4,9–5,3	4,4–5,6	6,0–6,1
Q_m , кВт	Расчет	534–864	461–1757	514–2039	431–2087	1591–2187	718–1082
	Паспорт.	560–930	480–1885	546–2208	462–2250	1750–2335	750–1160
	Δ , %	4,6–7,1	6,8–9,4	5,9–7,7	6,7–7,2	6,3–9,1	4,3–6,7

Для определения остаточного члена теплового баланса $Q_{ост}$ достаточно разности всех перечисленных составляющих теплового баланса в соотношении к сожженному топливу:

$$Q_{ост} = Q_t - (Q_e + Q_{ог} + Q_{охл} + Q_{нв} + Q_m). \quad (38)$$

К остаточному члену можно отнести ряд различных и трудноопределимых потерь энергии, как рассеивание тепла в окружающую среду, неполное сгорание топлива, кинетическая энергия выхлопных газов и т. д.

Как показывает сравнительный анализ полученных данных, в большинстве случаев, погрешность расчетов находится в пределах 4–6 %, что указывает на высокую точность предложенных математических зависимостей. При этом точность расчетов в значительной мере обусловлена степенью форсированности дизелей, что сказывается на особенностях распределения составляющих их теплового баланса. В частности, было отмечено, что у дизелей с высокой степенью форсированности ($p_{me} = 2,77$ МПа) наблюдается снижение потерь с ОГ при одновременном увеличении относительных потерь с охлаждением наддувочного воздуха (MaK Caterpillar VM43C).

Вместе с тем, у дизелей размерного ряда 51/60DF фирмы MAN Energy Solution, величина расчетной погрешности достигает значений в интервале до 9,8%, что объясняется наименьшими показателями форсированности рассмотренных дизелей ($p_{me} = 2,06$ МПа).

Заключение

1. Рост форсированности судовых дизелей привел к увеличению температуры НВ, охлаждающей жидкости, масла и ОГ, что увеличивает возможности утилизации их теплоты. В наибольшей степени это привело к росту потерь с ОГ и теплоты, передаваемой в системы охлаждения ЦПГ, смазочного масла и НВ, в связи с чем одним из перспективных путей повышения эффективности СЭУ являются методы и средства утилизации ВЭР, которые невозможно реализовать без определения источников и величины бросовой теплоты судовых дизелей.

2. Приведенные математические зависимости описывают связь между удельными показателями количества бросовой теплоты судового дизеля и параметрами, характеризующими особенности и условия эксплуатации СЭУ, что позволяет на стадии разработки схем и выбора параметров вновь проектируемых или модернизируемых судовых систем утилизации ВЭР получать достоверные данные о составляющих теплового баланса ГД.

3. Посредством поправочных коэффициентов (11)–(21), учитывающих как относительную нагрузку и частоту вращения коленчатого вала дизеля, так и работу ГД на ВРШ / ВФШ, стало возможным определять с высокой точностью расход и температуру теплоносителя при любых нагрузках и условиях окружающей среды, а также устанавливать наиболее эффективные режимы эксплуатации СЭУ и утилизационного оборудования без проведения экспериментальных исследований.

4. Преимуществом уравнения множественной линейной регрессии (10), определяющего температуру ОГ, является тот факт, что оно характеризует тепловое и теплонапряженное состояние судового дизеля в зависимости от показателей его форсированности и может быть использовано для оценки схем утилизации тепловых потерь с ОГ.

5. Эмпирические уравнения (25)–(26) и (28)–(29) позволяют рассчитывать бросовую теплоту, отводимую с охлаждением ЦПГ и наддувочного воздуха ГД, в любом интервале температур окружающей среды при частичной и номинальной нагрузке дизеля (в зависимости от частоты вращения коленчатого вала), когда другие известные методики определения искомого составляющих теплового баланса судовых дизелей такую зависимость не предусматривают.

6. Анализ величин погрешностей в табл. 1 позволяет утверждать, что использование предлагаемых зависимостей определения бросовой теплоты судового дизеля дает возможность с высокой точностью найти значения потерь теплоты с ОГ, охлаждением ЦПГ и НВ, со смазочным маслом (максимальная погрешность для дизелей фирмы MAN Energy Solution составляет 9,8 %, Wartsila Engines – 7,7 %, MAK-Caterpillar – 9,1 %).

Литература

1. Бажан П.И. Зависимости для расчета механического КПД и составляющих теплового баланса в воду и масло среднеоборотных дизелей // Двигателестроение. 1986. №3. С. 16–18.
2. Бехрендт Ц. Математические модели функционирования судового энергетического комплекса с глубокой утилизацией теплоты: дис. ... д-ра тех. наук. Калининград, 2004. 374 с.
3. Богданов А.И. Повышение мощностных, экономических и экологических показателей силовых установок за счет утилизации теплоты отработавших газов: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 1999. 184 с.
4. Дрозд М.С. Качественно-количественный анализ вторичных энергоресурсов среднеоборотных дизелей // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2018. №2. С. 135-140.
5. Дрозд М.С., Кича Г.П. Способы повышения тепловой эффективности энергетической установки на судах ледового плавания // Проблемы транспорта Дальнего Востока: Сборник докладов 13-ой научно-практической конференции с международным участием, 12–13 ноября 2019 года. Владивосток: Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 2019. С. 131–134.
6. Кардаков А.А. Оценка технического состояния судовых дизелей и систем газораспуска методом теплового диагностирования: автореф. ...канд. техн. наук: СПб., 2011. 24 с.
7. Костин А.К., Ларионов В.В., Михайлов Л.И. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания: Справочное пособие. Л., изд. «Машиностроение», 1979, 222 с.
8. Лугин В.Г., Дьячков С.В., Свердлов И.В. Утилизация теплоты, теряемой в окружающую среду двигателями внутреннего сгорания. Методика проведения расчетов // Труды международной научно-технической конференции энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства, 2012. С. 362–365.
9. Орлов А.Е. Методика определения расхода топлива и эффективной мощности, судовых ДВС в условиях эксплуатации: автореф. ... канд. техн. наук: СПб., 2009. 21 с.
10. Руководство ИМО по методу расчета конструктивного коэффициента энергетической эффективности для новых судов 2012. Резолюция MERC 212 (63): [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://docs.cntd.ru/document/499014496> (Дата обращения 16.10.2022 г.).
11. Product Features Three Medium Speed Engines - One Design Concept L 40/54, L/V 48/60, L 58/64. Wydawnictwo firmy MAN-B&W Diesel AG, Augsburg, 1999. 120 p.
12. MAN B&W G45ME-C9.5-GI-TII. Project Guide. MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, 2017. 456 p.
13. MAN 51/60DF. Project Guide. MAN Diesel & Turbo, Augsburg, 2018. 460 p.
14. WÄRTSILÄ 46DF. Product Guide. Wärtsilä, Vaasa, 2016. 202 p.
15. WÄRTSILÄ 50DF. Product Guide. Wärtsilä, Vaasa, 2016. 240 p.
16. MaK VM43C. Product Guide. Caterpillar motoren, Hamburg, 2012. 104 p.
17. MaK M46DF. Product Guide. Caterpillar motoren, Hamburg, 2015. 198 p.

Referents

1. Bazhan P.I., Aladyishkin V.Y. Zavisimosti dlya rascheta mehanicheskogo KPD i sostavliayushih teplovogo balansa v vodu i maslo sredneoborotnyh dizeley [Dependencies for calculation of mechanical efficiency and components of thermal balance in water and oil of medium-speed diesel engines]. Dizelestroenie. 1986. №3. S. 16-18.
2. Behrendt C. Matematicheskie modeli funkcionirovaniya sudovogo energeticheskogo kompleksa s glubokoy utilizatsiyey teploty [Mathematical models of the operation of the ship's power complex with deep heat utilization]: diss. dokt. tech. nauk. Kaliningrad, 2004. 374 s.
3. Bogdanov A.I. Povyshenie moshnostnyh, ekonomicheskikh i ekologicheskikh pokazateley silovykh ustanovok za schet utilizatsiyey teploty otrabotavshih gazov [Increase of power, economic and environmental parameters of power plants due to utilization of heat of exhaust gases]: diss. kand. tech. nauk. Chelyabinsk, 1999. 184 s.
4. Drozd M.S. Kachestvenno-kolichestvennyi analiz vtorichnykh energoresursov sredneoborotnykh dizeley [Qualitative and quantitative analysis of secondary energy resources of medium-speed diesel engines]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka. 2018. №2. S. 135-140.
5. Drozd M.S., Kicha G.P. Sposoby povysheniya teplovoy effektivnosti energeticheskoy ustanovki na sudah ledovogo plavaniya [Methods to increase thermal efficiency of power plant on ice navigation vessels]. Problemy transporta Dalnego Vostoka: Sbornik dokladov 13-oy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, 12–13 noyabrya 2019 goda. Vladivostok: Morskoy Gosudarstvennyy Universitet im. adm. G.I. Nevelskogo, 2019. S. 131–134.
6. Kardakov A.A. Otcenka tehnikeskogo sostoyaniya sudovykh dizeley i system gazovypuska metodom teplovogo diagnostirovaniya [Assessment of technical condition of ship diesel engines and gas exhaust systems by thermal diagnostics]: diss. kand. tech. nauk. SPb., 2011. 24 s.
7. Kostin A.K., Larionov V.V., Michaylov L.I. Teplonapryazhennosty dvigateley vnutrennego sgoraniya. Spravochnoye posobie. [Thermal stress of internal combustion engines: Reference manual] L., izd. «Mashinostroeniye», 1979, 222 s.
8. Lugina V.G. Utilizatsiya teploty, teryaemoy v okruzhayushuyu sredyu dvigatelyami vnutrennego sgoraniya. Metodika provedeniya raschetov [Disposal of heat lost to the environment by internal combustion engines. Calculation procedure]. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-technicheskoy konferentsii energoobespechenie b energosberezhenie v selskom hozyajstve. M.: Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut elektrificacii selskogo hozyajstva, 2012. S. 362-365.

9. Orlov A.Y. Metodika opredeleniya rashoda topliva i effektivnoy moshnosti sudovyh DVS v usloviyah ekspluatatsii [Procedure for determination of fuel consumption and effective capacity of ship's ICE under operating conditions]: diss. kand. tech. nauk, SPb. 2009. 21 s.
10. Rukovodstvo IMO po metodu rascheta konstruktivnogo koeffitsienta energeticheskoy effektivnosti dlya novykh sudov 2012. Rezolutsiya MERC 212 (63) [IMO Guidelines on the Method of Calculating the Design Energy Efficiency Factor for New Vessels 2012. MERC Resolution 212 (63)]: [Elektronnyi resurs] Rezhim dostupa: URL: <https://docs.cntd.ru/document/499014496> (data obrasheniya 16.10.2022 г.).
11. Product Features Three Medium Speed Engines - One Design Concept L 40/54, L/V 48/60, L 58/64. Wydawnictwo firmy MAN-B&W Diesel AG, Augsburg, 1999. 120 p.
12. MAN B&W G70ME-C9.5-GI-TII. Project Guide. MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, October 2017. 456 p.
13. MAN 51/60DF. Project Guide. MAN Diesel & Turbo, Augsburg, 2018. 460 p.
14. WÄRTSILÄ 46DF. Product Guide. Wärtsilä, Vaasa, 2016. 202 p.
15. WÄRTSILÄ 50DF. Product Guide. Wärtsilä, Vaasa, 2016. 240 p.
16. MaK VM43C. Product Guide. Caterpillar motoren, Hamburg, 2012. 104 p.
17. MaK M46DF. Product Guide. Caterpillar motoren, Hamburg, 2015. 198 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

Геннадий Петрович Кича, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой судовых двигателей внутреннего сгорания; Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: kicha@msun.ru.

Gennadiy P. Kicha, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of marine internal combustion engines; Maritime State University named admiral G.I. Nevelskoy, Verhneportovay str. 50a, Vladivostok, 690003, Russian Federation, e-mail: kicha@msun.ru

Михаил Сергеевич Дрозд, аспирант кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: drozd.mikhail@rambler.ru

Mikhail S. Drozd, graduate student of the Department of marine internal combustion engines Maritime state university named admiral G.I. Nevelskoy, Verhneportovay str. 50a, Vladivostok, 690003, Russian Federation, e-mail: drozd.mikhail@rambler.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 16.05.2022.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.11.2022.
Принята к публикации/accepted for publication 28.01.2023.

Научная статья

УДК 621.431.7

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.013>

Использование искусственной нейронной сети для определения уровня износа цилиндропоршневой группы судового двигателя

А. И. Епихин¹ bsmbeton@mail.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, Новороссийск

Аннотация. В статье проведен детальный анализ особенностей использования искусственной нейронной сети в задачах диагностирования и прогнозирования технического состояния элементов судовой энергетической установки. Рассмотрены перспективы и особенности использования искусственной нейронной сети для определения уровня износа цилиндропоршневой группы судового двигателя. Формализованная в статье нейросетевая прогностическая модель позволяет определять уровень износа цилиндропоршневой группы судового двигателя на базе нейронного предиктора. Помимо этого, она дает возможность анализировать функциональные связи между параметрами и делать выводы об исправности диагностируемых элементов. Отдельное внимание уделено построению схемы нейронного предиктора и выбору диагностических параметров. Для реализации на практике предложенной модели представлен перечень параметров работы цилиндропоршневой группы судового двигателя, которые могут подаваться на вход модели. Кроме того, в статье уточнен алгоритм обучения нейронной сети, основу которого составляет правило нормализованного наименьшего среднеквадратичного.

Ключевые слова: судно, двигатель, цилиндропоршневая группа, нейронная сеть, предиктор.

Для цитирования: Епихин А.И. Аналитический метод определения мощности энергетической установки катамарана, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 112—119. DOI:10.37220/MIT.2023.59.1.013

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.013>

Using an artificial neural network to determine the wear level of the cylinder piston group of a marine engine

Aleksey I. Epikhin¹ bsmbeton@mail.ru

¹Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. The article presents a detailed analysis of the peculiarities of using artificial neural network in the tasks of diagnosis and prediction of the technical condition of the elements of ship power plant. The prospects and peculiarities of using artificial neural network for determining the wear level of the cylinder-piston group of a ship engine are considered. The prognostic neural network model formalized in the article allows to determine the wear level of a ship engine cylinder-piston group on the basis of a neural predictor. Besides, it makes it possible to analyze functional relations between parameters and draw conclusions about serviceability of diagnosed elements. Separate attention is paid to the construction of the neural predictor circuit and the choice of diagnostic parameters. In order to put the proposed model into practice the list of ship engine cylinder-piston group operating parameters which can be fed into the model input is presented. In addition, the article specifies the learning algorithm of the neural network, the basis of which is the rule of the normalized least mean square.

Key words: ship, engine, cylinder-piston group, neural network, predictor.

For citation: Aleksey I. Epikhin Using an artificial neural network to determine the wear level of the cylinder piston group of a marine engine. Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 112—119. DOI:10.37220/MIT.2023.59.1.013

Введение

Современный судовой двигатель представляет собой достаточно сложный, технически совершенный объект, его надежная и безотказная работа влияет на безопасность и экономическую эффективность работы все энергетической установки в целом. При этом необходимо отметить, что обеспечение высоких эксплуатационных параметров судовых энергетических установок напрямую зависит от качества рабочих процессов, непосредственно обеспечиваемых поддержанием спецификационных показателей функционирования основных элементов двигателя, в том числе цилиндров, правильная работа которых позволяет

обеспечить рациональное использование мощности двигателя и снижение расхода топлива [1], [5].

С учетом вышеизложенного, не подлежит сомнению тот факт, что система контроля и диагностики судового двигателя и его элементов должна за минимальное возможное время с максимальной точностью при минимально допустимой погрешности выявлять отклонение рабочих параметров от заданных, чтобы не допустить возникновения отказов, которые могут повлечь за собой необратимые разрушения.

Решение проблемы эксплуатационного контроля работы судового двигателя и, в частности, цилиндропоршневой группы, связано с

определенными трудностями методологического и конструктивного характера. К первым относятся высокие давления топлива и большие частоты нестационарных процессов при впрыске топлива. Сложности конструктивного плана связаны с отсутствием штатных точек доступа в топливную систему высокого давления и к рабочим элементам форсунки. В тоже время применяемые на практике методы мониторинга работы топливной аппаратуры достаточно сложны и не находят широкого применения в эксплуатации судовых дизелей.

Материалы и методы

На сегодняшний день одним из возможных путей повышения качества и оперативности диагностики цилиндропоршневой группы судового двигателя, является автоматизированный анализ параметров ее функционирования, реализуемый в рамках компьютерной диагностической системы с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС), имеющих обратную связь с использованием датчиков штатной бортовой системы [7].

Результатом нейросетевого диагностического анализа может быть:

- отнесение подконтрольного объекта к одному из классов технического состояния (например, исправные компрессионные кольца, критический износ гильзы, аварийное состояние направляющей части поршня);
- определение параметров, характеризующих техническое состояние двигателя в целом (например, изменение КПД турбокомпрессора по стандартному значению).

Основанное на нейронной сети обнаружение неисправностей рассматривается как проблема распознавания образов, которая базируется на выборе средств, а также необходимости проведения многочисленных измерений. Акцент делается на соответствующей архитектуре нейронной сети и выборе наиболее информативных измерительных приборов, которые позволяют добиться высокой степени распознавания состояний и их обобщения [2], [9]. Кроме того, чтобы сеть начала работать, ее необходимо предварительно обучить, используя заранее подготовленные примеры. Особенностью ИНС является ее склонность к переобучению.

С учетом вышеизложенного, рассмотрение возможностей и перспектив использования ИНС для определения и диагностирования технического состояния судового двигателя и его элементов представляет собой важную научно-техническую задачу, необходимость решения которой и предопределяет выбор темы данной статьи.

Над совершенствованием контроля рабочих процессов судовых дизелей в эксплуатации путем разработки новых методов и средств мониторинга с использованием интеллектуального анализа работают такие ученые как: Колпаков В. Е., Хватов О. С., М. А. Pourzanjani, G N Roberts, Ünver, Bedir.

Особенности формирования набора данных для обучения нейронных сетей, предназначенных проводить диагностику и классификацию неисправленной в различных технических системах, нашли свое отражение в трудах Киселева Д. Ю., Пушкарева Д. О., Комарова К. М., Gajewski, Jakub; Vališ, David; Po, Li-Chi Cliff; Žarković, Mileta D.

Однако, несмотря на имеющийся комплекс работ и, безусловно, весомые наработки в рассматриваемой предметной плоскости, необходимо обратить внимание на тот факт, что в связи с усложнением технической составляющей судовых двигателей, появлением большого количества цифровых технологий актуализируются новые вопросы, которые требуют дополнительного изучения и более глубокого исследования.

Так, на практике при решении реальных задач приходится сталкиваться со сложными, линейно нераздельными областями диагностических признаков работы судовых двигателей, кроме того, имеет место ограниченное количество образцов, на основании которых возможно построение классификатора. Также определенные трудности вызывает задача разработки алгоритма, который бы учитывал в процессе диагностики изменение режимов работы и внешних условий эксплуатации судовой энергетической установки.

Таким образом, с учетом вышеизложенного, цель статьи заключается в проведении детального анализа особенностей использования искусственной нейронной сети для определения уровня износа цилиндропоршневой группы (ЦПГ) судового двигателя.

При диагностировании и прогнозировании технического состояния деталей ЦПГ существует оправданная необходимость использования принципов «нечеткости» - на вход нейронной сети будем подавать значения контролируемых переменных, прошедших этап «фазсификации». Нейронная сеть в последующем будет выполнять задачу универсального аппроксиматора функции, которая зависит от нескольких переменных:

$$Y = F(X)$$

где $\{X(t)\}$, $\{X_1(t), X_2(t), X_3(t), \dots, X_n(t)\}$ – входные данные (информация о рабочем состоянии и значения диагностических параметров);

Y – реализация функции нескольких переменных.

На практике выявление дефектов технических систем с помощью диагностической матрицы осуществляется с помощью нейронной сети «персептрон». Будем использовать искусственную нейронную сеть прямого распространения, имеющую несколько слоев нейронов: входной, несколько скрытых слоев и выходной слой. Эти сети статические в том смысле, что для заданного входного сигнала они производят одну совокупность выходных значений, не зависящих от предыдущих состояний сети [3], [8], [10].

В качестве основы многослойного персептрона выберем радиальную базисную функцию, которая определяется в виде линейной комбинации радиальных базисных функций:

$$y(x) = \sum_{i=1}^M \omega_i \cdot \Phi_i(\underline{x}, \underline{c}_i, \sigma_i)$$

где ω_i - результирующие веса, связанные с каждой из M базисных функций; $\underline{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ - входной вектор; σ_i - ширина базисных функций; $\underline{c}_i = [c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{in}]^T$ - векторы центра координат M базисных функций.

Наиболее популярная радиальная базисная функция, известна как гауссова:

$$G(x, c_i, \sigma_i) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{(x_1 - c_{i1})^2}{\sigma_i^2} + \frac{(x_2 - c_{i2})^2}{\sigma_i^2} + \dots + \frac{(x_n - c_{in})^2}{\sigma_i^2}\right)\right)$$

$$\Phi_i(x, c_i, \sigma_i) = \frac{G_i}{\sum_{j=1}^M G_j}$$

Результаты

Таким образом, для реализации системы диагностики была выбрана сеть прямого распространения типа многослойного перцептрона, с тремя слоями: два скрытых и один выходной. Размер

первого скрытого слоя 60 нейронов, второго 80. Учитывая поставленную в статье задачу, при выборе количества слоев использовалось правило, согласно которому если функция определена на конечном множестве точек, то 3-хслойный перцептрон способен ее аппроксимировать. В качестве инструментального средства использовалось специальное программное обеспечение Brain.js. Правильность выбора количества нейронов покажут результаты обучения сети.

Уникальной особенностью анализа технического состояния ЦПГ с использованием многослойного перцептрона является возможность проведения диагностики с помощью нейронных предикторов (см. рис. 1).

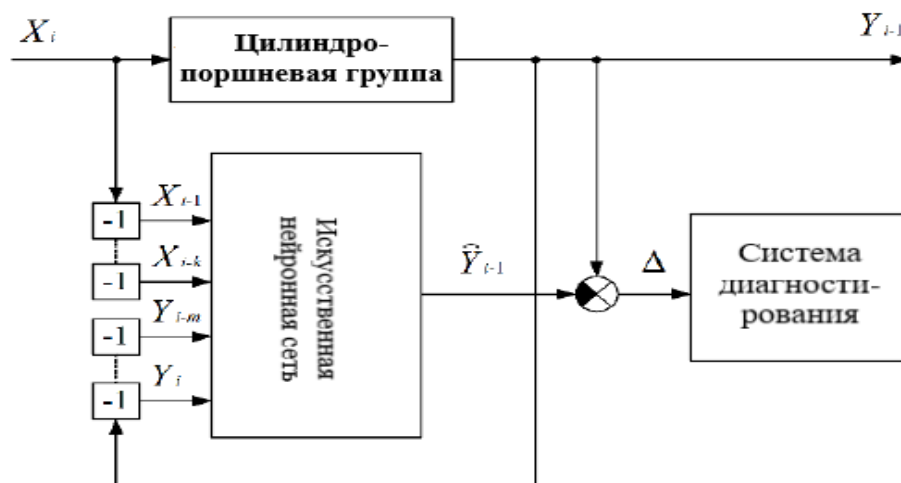


Рис. 1 Схематическое изображение нейронного предиктора

Реализация данной модели с помощью искусственной нейронной сети позволит прогнозировать величину исходного вектора на один шаг вперед, а также его состояние, основываясь на предыстории [4], [6]. При получении наборов данных целесообразно применять нелинейную математическую модель рабочего процесса (ММРП) второго уровня сложности, использующую формальное описание характеристик основных элементов ЦПГ.

Основным условием использования нейронной сети является ее обучение на данных, которые получены от исправного судового двигателя при его работе в разных динамических режимах, в том числе и при отключении части цилиндров [10, 12].

На основании экспериментальных исследований, которые отражают отклонения уровня неисправностей цилиндропоршневой группы, в качестве диагностических параметров предложено воспользоваться значениями параметров гармонических составляющих параметров зависимых функций – коэффициенты $a_{n(N)}, \beta_{n(N)}, \chi_{n(N)}, \delta_{n(N)}$ представляющие собой действующие значения гармонических составляющих выходных и входных данных от контролирующих штатных датчиков.

Общий алгоритм выявления уровня износа цилиндропоршневой группы судового двигателя с использованием искусственно нейронной сети представлен на рис. 2.

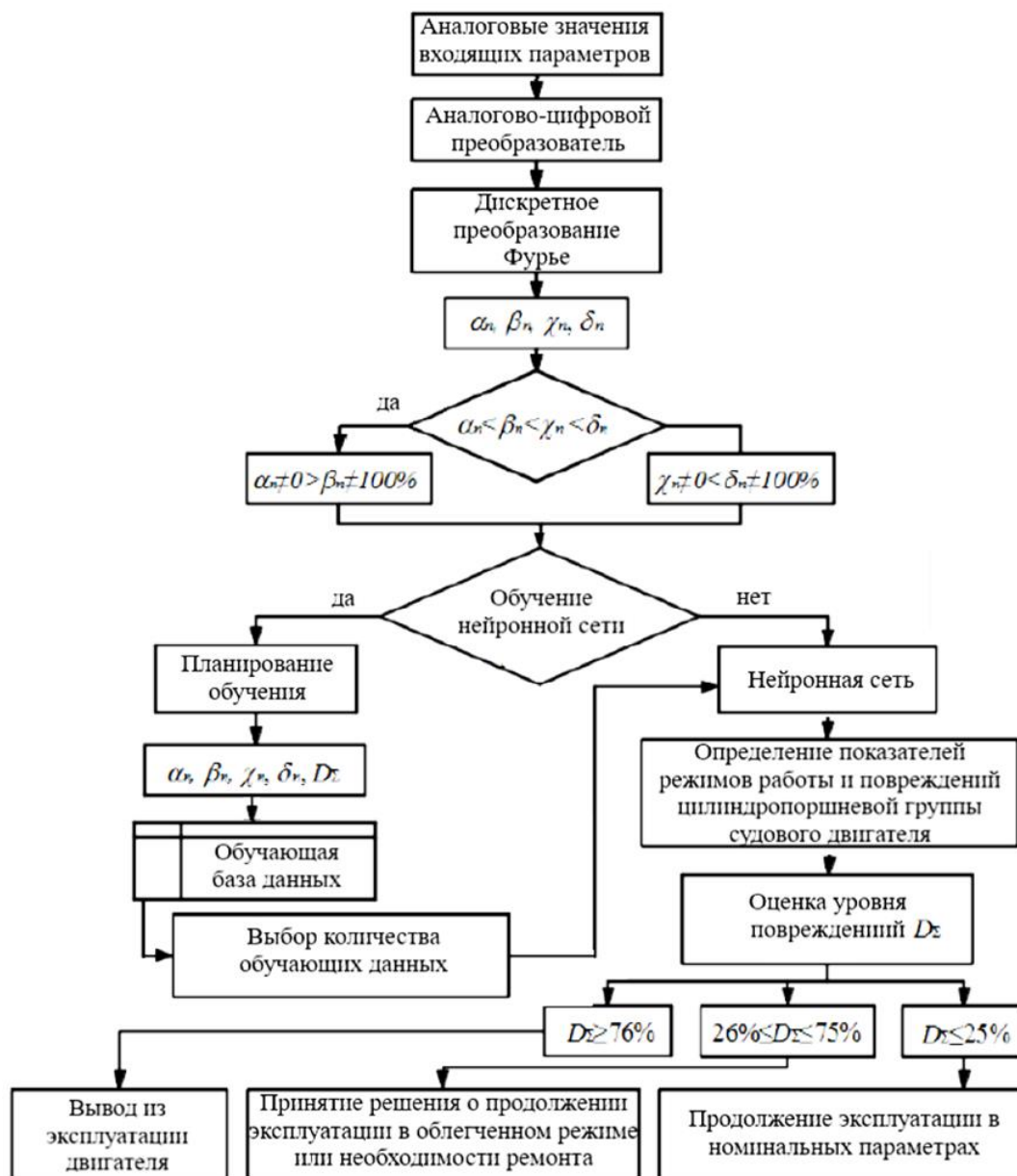


Рис. 2 Алгоритм выявления уровня износа цилиндропоршневой группы судового двигателя

В процессе эксперимента вектор режимных параметров модели R подается на вход ММРП двигателя с заранее определенным техническим состоянием его ЦПГ. Искомые параметры рабочего процесса (ПРП) регистрируются на выходе модели. В качестве диагностических параметров при обучении сети могут быть использованы как непосредственно измеряемые параметры, так и их относительные значения \bar{D}_i :

$$\bar{D}_i = \frac{P_i - P_i^s}{P_i^s}$$

или абсолютные D диагностические отклонения:

$$D_i = P_i - P_i^s$$

где P_i, P_i^s - значение i -го параметра, соответственно, ЦПГ диагностируемого и стандартного двигателя в одном и том же режиме и в одинаковых условиях работы.

Векторы, составленные из этих параметров,

рассчитываются с использованием ММРП:

$$P = F(R, 0), P^s = F(R, \Delta a)$$

где Δa - набор (вектор) параметров ММРП, определяющих отличие выявленных характеристик элементов ЦПГ моделируемого объекта от стандартных.

При использовании диагностических отклонений в набор могут быть добавлены все или часть режимных параметров R . Условием включения в набор j -го режимного параметра является его существенная корреляция с полученным диагностическим отклонением (ДО). При использовании вместо ДО самих значений параметров все регистрируемые режимные параметры R обязательно добавляются в набор.

Согласно алгоритму, представленному на рис. 2, исследуемые значения гармонических составляющих выходных и входных данных от

контролирующих штатных датчиков с помощью аналого-цифрового преобразователя преобразуются в цифровой код. Последовательность этих цифровых кодов характеризует сигнал за определенный период времени. Блок дискретного преобразования Фурье разлагает исследуемый сигнал на гармонические составляющие, из которых для анализа берутся третья, пятая, седьмая и девятая гармоники. Затем определяются значения коэффициентов $\alpha_{n(N)}, \beta_{n(N)}, \chi_{n(N)}, \delta_{n(N)}$, представляющих собой действующие значения гармонических составляющих выходных и входных данных от контролируемых цилиндропоршневую группу штатных датчиков, установленных в судовом двигателе.

Значение показателей режимов работы и повреждения цилиндропоршневой группы судового

двигателя D_m является результатом анализа искусственной нейронной сети, полученного из значений диагностических параметров:

$$D_m = F(\alpha_{nA}, \beta_{nA}, \chi_{nA}, \delta_{nA}, \alpha_{nB}, \beta_{nB}, \chi_{nB}, \delta_{nB}, \alpha_{nC}, \beta_{nC}, \chi_{nC}, \delta_{nC}) = F\left(\sum_n (w_{\alpha nA} \alpha_{nA} + w_{\beta nA} \beta_{nA} + w_{\chi nA} \chi_{nA} + w_{\delta nA} \delta_{nA} + w_{\alpha nB} \alpha_{nB} + w_{\beta nB} \beta_{nB} + w_{\chi nB} \chi_{nB} + w_{\delta nB} \delta_{nB} + w_{\alpha nC} \alpha_{nC} + w_{\beta nC} \beta_{nC} + w_{\chi nC} \chi_{nC} + w_{\delta nC} \delta_{nC})\right)$$

где w – весовые коэффициенты нейронной сети для соответствующих диагностических параметров.

В таблице 1 представлен перечень параметров работы ЦПГ, которые будут являться входными для нашей ИНС. В качестве результирующего сигнала выходного слоя будем иметь определение технического состояния судового двигателя.

Таблица 1

Входные и выходные параметры искусственной нейронной сети

Входные значения (после фаззификации)	Параметр	Выходные значения (функция кластеризации)
1 Мощность двигателя (кВт)	Мощность	Техническое состояние судового двигателя
2 Температура охлаждающей жидкости (°C)	Температура	
3 Расход воздуха (м³/км·ч)	Воздух	
4 Давление масла (МПа)	Давление	
5 Расход топлива (г/км·ч)	Расход	
6 Шум (дБ)	Шум	
7 Давление в конце такта сжатия (МПа)	Давление такта	
8 Выхлопные газы (%)	Выхлопные газы	
9 Количество картерных газов (л)	Количество газов	
10 Давление картерных газов (МПа)	Давление газов	
11 Количество отключенных цилиндров (шт)	Отключенные цилиндры	

Итак, входными сигналами нейронной сети выступают значения диагностируемых параметров ЦПГ, полученные нейронной сетью от датчиков, являющихся штатными в судовом двигателе, и дополнительно те же сигналы, но зафиксированные с задержкой на некоторое время. Выходным сигналом является исправное функционирование судового двигателя в заданных технических пределах. Выходное значение «техническое состояние судового двигателя» будет соответствовать одному из выбранных классов, о которых уже упоминалось ранее – надежность работы ЦПГ с определением конкретной поломки или работоспособность двигателя в целом.

Для запуска нейронной сети также будут заданы лингвистические переменные и функции принадлежности по типу расходы топлива – высокие, средние, низкие; давление картерных газов – нормальное, допустимое, критическое и т.д. Затем с использованием гармонических составляющих будет происходить отбор показаний от бортовых датчиков. Полученные по результатам наблюдения данные позволят сформулировать промежуточные выводы, которые с учетом их весов и экспертной оценки

составят в итоге окончательное заключение, это заключение будет находиться в каком-то вероятностном диапазоне. Интерпретировать полученную в ходе эксперимента информацию будет специалист, который на основе анализа всей выборки показателей выберет соответствующий режим работы двигателя.

Для обучения нейронного предиктора в режиме реального времени работы судового двигателя был разработан специальный алгоритм. В рамках данного алгоритма осуществляется локальная настройка нейронных весов, а основу самого алгоритма составляет правило нормализованного наименьшего среднеквадратичного:

$$w_i^{new} = w_i^{old} + \mu \cdot e(x) \cdot \frac{\Phi_i(x)}{\sum_{i=1}^M \Phi_j^2(x)}$$

где $e(x)$ - обозначает ошибку между правильным и предыдущим значением, полученным сетью, μ - уровень обучения, который должен находиться в диапазоне $0 < \mu < 2$.

На рис. 3 приведена блок-схема алгоритма обучения на основе правила нормализованного наименьшего среднеквадратичного.

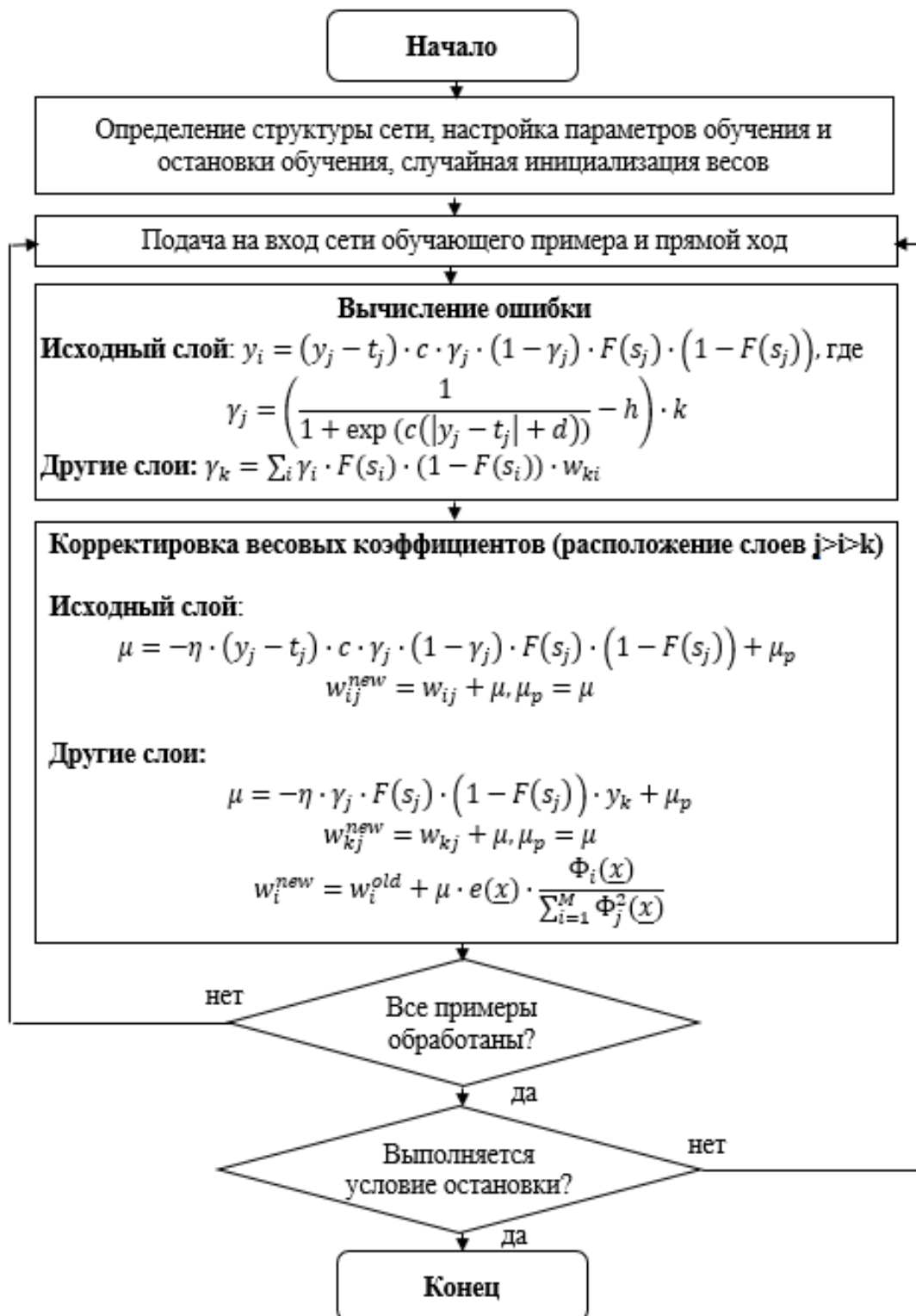


Рис. 3 Блок-схема разработанного алгоритма обучения нейронной сети

На рис. 3 y_j - фактический выход нейронной сети, t_j - желаемый выход нейронной сети, h - смещение сигмоидального участка относительно оси абсцисс, c - наклон сигмоидальной линии, d - приравняет значению функции к нулю без разницы между фактическим и желаемым выходом сети, k - приравняет значение функции к 1 между

фактической и желаемой выходной мощностью сети, что составляет 1, μ - коэффициент инерции, η - коэффициент скорости обучения, s_j является взвешенной суммой входных сигналов нейрона, то есть аргументом функции активации,

Таким образом, в статье описан подход к определению уровня износа цилиндропоршневой группы судового двигателя на основе нейронного

предиктора. Он позволяет анализировать функциональные связи между параметрами и делать выводы об исправности диагностируемых элементов.

Для получения более точных результатов наблюдений в процессе исследования предложен усовершенствованный алгоритм обучения нейронной сети на основе правила нормализованного наименьшего среднеквадратичного.

Полученные результаты указывают

принципиальную возможность создания прогностических моделей узлов и агрегатов испытуемых двигателей и других сложных частей механических установок судна, что на практике позволит обеспечить получение расширенной достоверной базы знаний, увеличить скорость обработки информации, повысить точность технического диагноза и возможность оперативного определения технического состояния судового двигателя в режиме реального времени.

Литература

1. Колпаков В. Е. Совершенствование методов и средств диагностирования двигателей внутреннего сгорания на примере вспомогательных двигателей корабельных энергетических установок // *Известия Международной академии аграрного образования*. 2020. № S49. С. 40-42.
2. Gajewski, Jakub Verification of the technical equipment degradation method using a hybrid reinforcement learning trees–artificial neural network system // *Tribology international*. 2021. Volume 153; pp 123-131.
3. Ansari, Anaam Hardware Acceleration of a Generalized Fast 2-D Convolution Method for Deep Neural Networks // *IEEE access: practical innovations, open solutions*. 2022. Volume 10; pp 16843-16858.
4. Fusion of neural networks, fuzzy systems and genetic algorithms: industrial applications / edited by Lakhmi C. Jain, N.M. Martin. Boca Raton: CRC Press, 2020. 176 p.
5. Epikhin, A. I. Method for synthesis of an intelligent automatic system for diagnosing combustion engine vibration of the power supply system of an unmanned vessel / A. I. Epikhin // *Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual*, 15–16 июня 2021 года. – Novorossiysk, Virtual, 2021. – P. 012023. – DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012023. – EDN TBWJOM.
6. Khekert, E. V. Analysis of methods to optimize control systems for power supply of marine vessels using fuzzy logic and fractal analysis / E. V. Khekert, A. I. Epikhin // *Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual*, 15–16 июня 2021 года. – Novorossiysk, Virtual, 2021. – P. 012088. – DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012088. – EDN RLTBKV.
7. Kondratyev, S. I. Using telematics data to support effective solutions for tracking and monitoring the power system condition of unmanned vessels / S. I. Kondratyev, A. I. Epikhin // *Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual*, 15–16 июня 2021 года. – Novorossiysk, Virtual, 2021. – P. 012089. – DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012089. – EDN QOSRJQ.
8. Епихин, А. И. Принципы нейроуправления и варианты архитектуры нейронных сетей, применительно к сложной динамической системе СЭУ-СУДНО / А. И. Епихин, Е. В. Хекерт, М. А. Модина // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2020. – № 4-4(50). – С. 18-22. – DOI 10.37220/MIT.2020.50.4.091. – EDN KSVETP.
9. Scurtu, I. C. Development of neural networks for predicting the risk of failure of components of ship machines and mechanisms of marine autonomous surface vessels / I. C. Scurtu, A. I. Epikhin, E. V. Khekert // *Эксплуатация морского транспорта*. – 2022. – No 1(102). – P. 103-107. – DOI 10.34046/aumsuomt102/21. – EDN QBAUMO.
10. Коваленко, И. Ю. Определение технического состояния СДВС с помощью искусственных нейросетей / И. Ю. Коваленко, А. И. Епихин // *Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова*. – 2022. – № 1(38). – С. 14-16. – EDN XYQBMY.
11. Епихин, А. И. Принципы нейроуправления и варианты архитектуры нейронных сетей, применительно к сложной динамической системе СЭУ-СУДНО / А. И. Епихин, Е. В. Хекерт, М. А. Модина // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2020. – № 4-4(50). – С. 18-22. – DOI 10.37220/MIT.2020.50.4.091. – EDN KSVETP.
12. Епихин, А. И. Искусственный интеллект, перспективы применения в управлении судовыми энергетическими установками / А. И. Епихин, С. И. Кондратьев // *Эксплуатация морского транспорта*. – 2020. – № 4(97). – С. 95-100. – DOI 10.34046/aumsuomt97/17. – EDN XFNNQR.

References

1. Kolpakov V. E. Sovershenstvovanie metodov i sredstv diagnostirovaniya dvigatelej vnutrennego sgoraniya na primere vspomogatel'nyh dvigatelej korabel'nyh energeticheskikh ustanovok // *Izvestiya Mezhdunarodnoj akademii agrarnogo obrazovaniya*. 2020. № S49. S. 40-42.
2. Gajewski, Jakub Verification of the technical equipment degradation method using a hybrid reinforcement learning trees–artificial neural network system // *Tribology international*. 2021. Volume 153; rr 123-131.
3. Ansari, Anaam Hardware Acceleration of a Generalized Fast 2-D Convolution Method for Deep Neural Networks // *IEEE access: practical innovations, open solutions*. 2022. Volume 10; pp 16843-16858.
4. Fusion of neural networks, fuzzy systems and genetic algorithms: industrial applications / edited by Lakhmi C. Jain, N.M. Martin. Boca Raton: CRC Press, 2020. 176 p.
5. Epikhin, A. I. Method for synthesis of an intelligent automatic system for diagnosing combustion engine vibration of the power supply system of an unmanned vessel / A. I. Epikhin // *Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual*, 15–16 iyunya 2021 goda. – Novorossiysk, Virtual, 2021. – P. 012023. – DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012023. – EDN TBWJOM.
6. Khekert, E. V. Analysis of methods to optimize control systems for power supply of marine vessels using fuzzy logic

- and fractal analysis / E. V. Khekert, A. I. Epikhin // Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual, 15–16 iyunya 2021 goda. – Novorossiysk, Virtual, 2021. – P. 012088. – DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012088. – EDN RLTKBV.
7. Kondratyev, S. I. Using telematics data to support effective solutions for tracking and monitoring the power system condition of unmanned vessels / S. I. Kondratyev, A. I. Epikhin // Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual, 15–16 iyunya 2021 goda. – Novorossiysk, Virtual, 2021. – P. 012089. – DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012089. – EDN QOSRJK.
 8. Epihin, A. I. Principy nejrouravleniya i varianty arhitektury nejronnyh setej, primenitel'no k slozhnoj dinamicheskoj sisteme SEU-SUDNO / A. I. Epihin, E. V. Hekert, M. A. Modina // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2020. – № 4-4(50). – S. 18-22. – DOI 10.37220/MIT.2020.50.4.091. – EDN KSVETP.
 9. Scurtu, I. C. Development of neural networks for predicting the risk of failure of components of ship machines and mechanisms of marine autonomous surface vessels / I. C. Scurtu, A. I. Epikhin, E. V. Khekert // Ekspluatsiya morskogo transporta. – 2022. – No 1(102). – P. 103-107. – DOI 10.34046/aumsuomt102/21. – EDN QBAUMO.
 10. Kovalenko, I. YU. Opredelenie tekhnicheskogo sostoyaniya SDVS s pomoshch'yu iskusstvennyh nejrosetej / I. YU. Kovalenko, A. I. Epihin // Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F.F. Ushakova. – 2022. – № 1(38). – S. 14-16. – EDN XYQBMY.
 11. Epihin, A. I. Principy nejrouravleniya i varianty arhitektury nejronnyh setej, primenitel'no k slozhnoj dinamicheskoj sisteme SEU-SUDNO / A. I. Epihin, E. V. Hekert, M. A. Modina // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2020. – № 4-4(50). – S. 18-22. – DOI 10.37220/MIT.2020.50.4.091. – EDN KSVETP.
 12. Epihin, A. I. Iskusstvennyj intellekt, perspektivy primeneniya v upravlenii sudovymi energeticheskimi ustanovkami / A. I. Epihin, S. I. Kondrat'ev // Ekspluatsiya morskogo transporta. – 2020. – № 4(97). – S. 95-100. – DOI 10.34046/aumsuomt97/17. – EDN XFNNQR

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей 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

Alexey I Epikhin Ph.D (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department "Operation of ship mechanical installations" Admiral Ushakov State Maritime University, 353924, Novorossiysk, Lenin Ave., 93, e-mail: bsmbeton@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.11.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.02.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 28.02.2023.

Научная статья

УДК 621.438

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.014>

Управление генерацией теплоты в когенерационных газотурбинных установках с регенерацией на частичных нагрузках

А.В. Дологлонян¹ dologlonyan@mail.ru, В.Т. Матвеев¹ mvt3900@mail.ru,
А.Г. Клименко¹ kag195877@gmail.com

¹Институт природно-технических систем, Российской академии наук, Севастополь, Россия

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 режиме 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) на базе простого цикла (ПЦ) с регенерацией теплоты (Р) относительная теплота, переданная на теплоснабжение, возрастает с понижением относительного расхода воздуха через регенератор и практически не зависит от относительной мощности, а для МГТУ на базе ПЦ с турбокомпрессорным утилизатором (ТКУ) и Р относительная теплота, переданная на теплоснабжение, возрастает с понижением относительного расхода воздуха через регенератор и снижается при уменьшении относительной мощности. Показано, что использование байпасирования воздуха мимо регенератора для МГТУ на базе ПЦ с ТКУ и Р целесообразно при нагрузках близких к номинальным, а для МГТУ на базе ПЦ с Р – во всем диапазоне нагружения. Определено, 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, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 120—128. DOI:10.37220/MIT.2023.59.1.014

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.014>

Control of heat generation in cogeneration gas-turbine plants with regeneration at partial loads

Andrey V. Dologlonyan¹ dologlonyan@mail.ru, Valeriy T. Matvienko¹ mvt3900@mail.ru,
Alexander G. Klimenko¹ kag195877@gmail.com

¹Institute of Nature and Technical Systems, Sevastopol, Russian Federation

Abstract. The subject of consideration in the article is the study of the effect of air bypass past the regenerator on the characteristics of cogeneration gas turbine plants with regeneration at partial loads in the generator loading mode. The completed 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) based on a simple cycle (SC) with regeneration (R), the relative heat transferred to heat supply increases with a decrease in the relative air flow through the regenerator and practically does not depend on the relative power, and for MGTP based on PC with a turbocharger utilizer (TCU) and R, 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 the use of air bypass past the regenerator for MGTP based on SC with TCU and R is rational at loads close to nominal, and for MGTP based on SC with R – in the all loading range. It has been determined that in any mode of operation of the 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.

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

Financial Support: The work was performed according to the state budget theme of IPTS "Creation of scientific bases for the development of flexible multi-generation installations using renewable energy sources and local resources of cold in conditions of climatic changes" (state registration number 121122300068-6).

For citation: Dologlonyan A.V., Matveenko V.T., Klimenko A.G. Control of heat generation in cogeneration gas-turbine plants with regeneration at partial loads, Marine Intelligent Technologies. 2023. № 1 part 1, P. 120—128. DOI:10.37220/MIT.2023.59.1.014

Введение

Применение когенерационных технологий для обеспечения энергией локальных объектов морского и наземного базирования 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.

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 режиме

нагрузки.

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 Р (см. рис. 1), который является одновальным для привода электрогенератора, охладитель газов ОГ2 выполняет функции глушителя и котла-утилизатора.

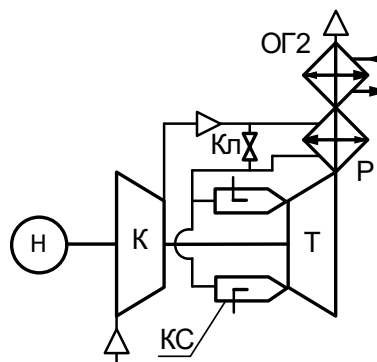


Рис. 1 – Схема когенерационной МГТУ на базе ПЦ+Р: К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; ОГ2 – охладитель газов; Н – нагрузка; Р – регенератор; Кл – байпасный клапан

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 турбокомпрессорный утилизатор (ТКУ). Посредством применения в рабочем цикле перерасширения рабочих газов за силовой турбиной увеличивается мощность двигателя при том же расходе топлива и, следовательно, повышается КПД двигателя.

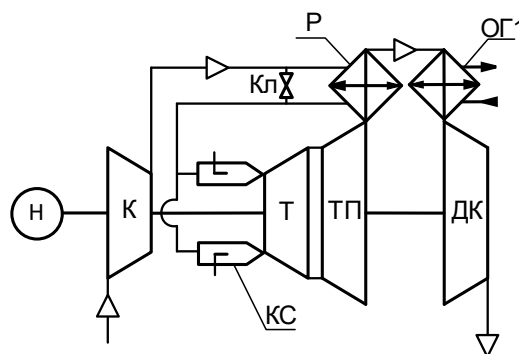


Рис. 2 – Схема когенерационной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р: ТП – турбина; ОГ1 – охладитель газов; ДК – дожимающий компрессор; остальные обозначения, как и на рис. 1

Изменение генерации тепловой энергии осуществляется управлением байпасным клапаном, 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.

Методика и результаты исследования характеристик 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 $\eta_m = 84...86$ %, неохлаждаемой 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 рис. 1 и 2, были приняты параметры, представленные в таблице 1 (в таблице 1 r – степень регенерации).

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	–	$\varepsilon_a = \left(1 + c_a \frac{r}{1-r}\right)^{-1}$
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны газа для ПЦ+ТКУ+Р ³	–	$\varepsilon_a = \frac{1}{2c_a \varepsilon_{ог1}^2 \pi_{ок}^2} \frac{1-r}{r} \left(\sqrt{1 + 4c_a \varepsilon_{ог1}^2 \pi_{ок}^2 \frac{r}{1-r}} - 1 \right)$
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны воздуха ³	–	$\varepsilon_a = 1 - c_a \frac{r}{1-r}$
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_a и c_b определялись из параметров существующих прототипов [11].		

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

Результаты исследования характеристик МГТУ на частичных нагрузках. Анализ характеристик циклов МГТУ на частичных нагрузках производился на генераторном режиме (при постоянном числе оборотов) с заблокированной силовой турбиной и

свободным ТКУ согласно методам, предложенным в работах [4, 12, 13] и опробованных, например, в работе [14]. Генераторный режим является типичным для подводных и надводных судов с электродвижением, а также других локальных объектов. Результаты исследования МГТД на частичных нагрузках представлены на рис. 3.

Таблица 2

Параметры МГТУ на номинальном режиме при максимальной температуре цикла $T_3 = 1373 \text{ K}$

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

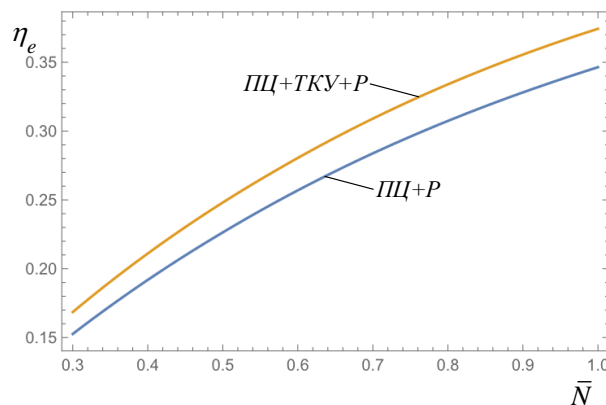


Рис 3 Зависимость КПД МГТУ, изображенных на рис. 1 и 2 от относительной нагрузки

Из рис. 3 видно, что эффективность схем МГТУ, изображенных на рис 1, 2 и представленных в табл. 2, распределяется без изменений и на частичных нагрузках.

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

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

$$g_p = \frac{G_{ep}}{G_e},$$

где G_e – расход воздуха через компрессор, кг/с; G_{ep} – 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 турбины перерасширения:

$$\bar{\pi}_{mn} = \frac{\pi_{mn}}{\pi_{mn0}},$$

где 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 рис. 4 и 5.

Рис. 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 %.

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 рис. 6-13.

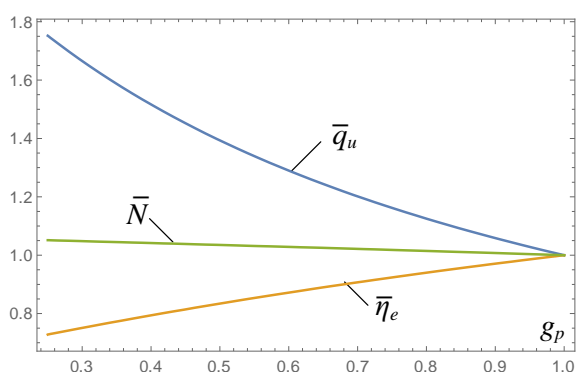


Рис. 4 Зависимость относительных параметров: КПД $\bar{\eta}_e$, теплоты \bar{q}_u , переданной на теплоснабжение, и мощности \bar{N} от относительного расхода через регенератор для МГТУ на базе ПЦ+Р

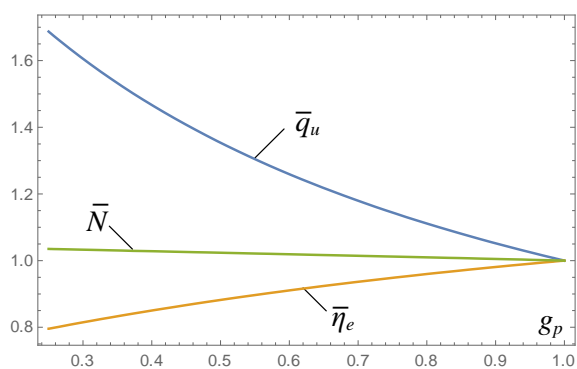


Рис. 5 Зависимость относительных параметров: КПД $\bar{\eta}_e$, теплоты \bar{q}_u , переданной на теплоснабжение, и мощности \bar{N} от относительного расхода через регенератор для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р

Анализ рис. 6 показывает, что относительный КПД МГТУ на базе ПЦ+Р снижается как при уменьшении относительной мощности, так и относительного расхода воздуха через регенератор. Рис. 6 наглядно показывает, что относительная теплота, переданная на теплоснабжение, возрастает с понижением относительного расхода воздуха через регенератор и практически не зависит от

относительной мощности. И хотя температура газов на входе в турбину снижается с уменьшением нагрузки, это компенсируется уменьшением степени расширения в турбине при генераторном режиме нагружения [13] (см. рис. 8). Из рис. 8 видно, что с уменьшением g_p возрастает относительная степень расширения в турбине $\bar{\pi}_m$, это объясняется снижением гидравлического сопротивления регенератора со стороны воздуха. Следует отметить, теплотехнический КПД установки также возрастает с уменьшением g_p (см. рис. 9), однако эти изменения незначительны. Кривая ab показывает границы изменения относительной мощности от относительного расхода через регенератор на номинальном режиме, аналогичные кривые, как например a_1b_1 , могут быть построены для любого долевого режима при условии постоянства относительного расхода воздуха через компрессор, для кривой ab он равен единице. Кривые ab и a_1b_1 (см. рис. 6-9) показывают, что на любом режиме эксплуатации МГТУ уменьшение g_p приводит к некоторому возрастанию мощности, особенно на малых нагрузках, что необходимо учитывать в процессе регулирования.

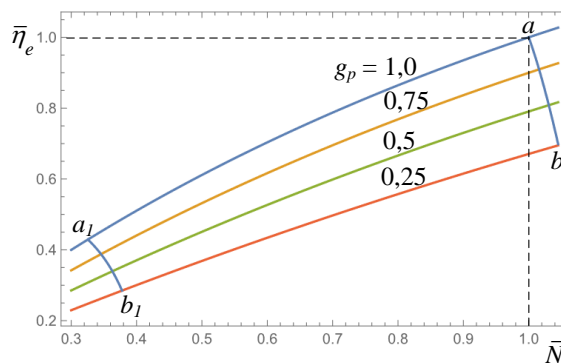


Рис. 6 – Зависимость относительного КПД $\bar{\eta}_e$ от относительной мощности \bar{N} при различных значениях g_p для МГТУ на базе ПЦ+Р

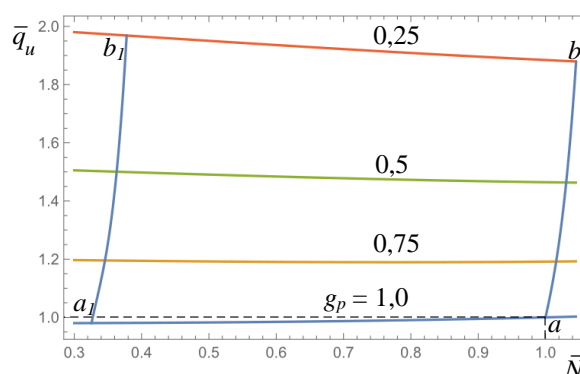


Рис. 7 – Зависимость относительной теплоты \bar{q}_u , переданной на теплоснабжение от относительной мощности \bar{N} при различных значениях g_p для МГТУ на базе ПЦ+Р

Анализ рис. 10 показывает, что относительный КПД МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р снижается как при уменьшении относительной мощности, так и относительного расхода воздуха через регенератор аналогично МГТУ на базе ПЦ+Р (см. рис. 6), хотя это

снижение и менее заметно. Рис. 11 иллюстрирует, что относительная теплота, переданная на теплоснабжение, возрастает с понижением относительного расхода воздуха через регенератор и увеличением относительной мощности. Как и для МГТУ на базе ПЦ+Р кривые ab и a_1b_1 (см. рис. 10-13) показывают, что на любом режиме эксплуатации МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р уменьшение g_p также приводит к некоторому возрастанию мощности. Теплотехнический КПД установки на базе ПЦ+ТКУ+Р (см. рис. 12) изменяется аналогично, что и для МГТУ на базе ПЦ+Р, однако диапазон существенно выше, что связано с характером изменения \bar{q}_u (см. рис. 11).

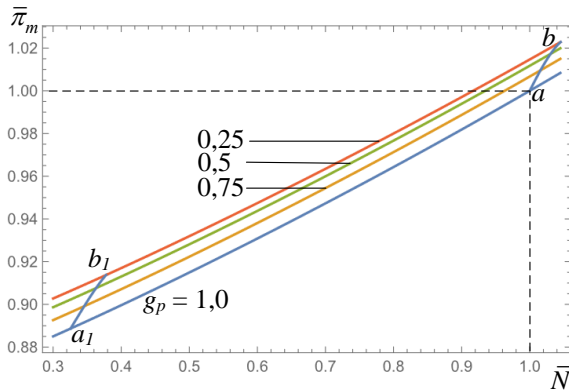


Рис. 8 – Зависимость относительной степени расширения турбины $\bar{\pi}_m$ от относительной мощности \bar{N} при различных значениях g_p для МГТУ на базе ПЦ+Р

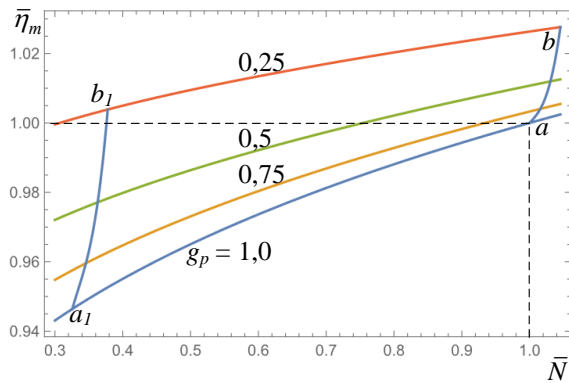


Рис. 9 – Зависимость относительного теплотехнического КПД $\bar{\eta}_m$ от относительной мощности \bar{N} при различных значениях g_p для МГТУ на базе ПЦ+Р

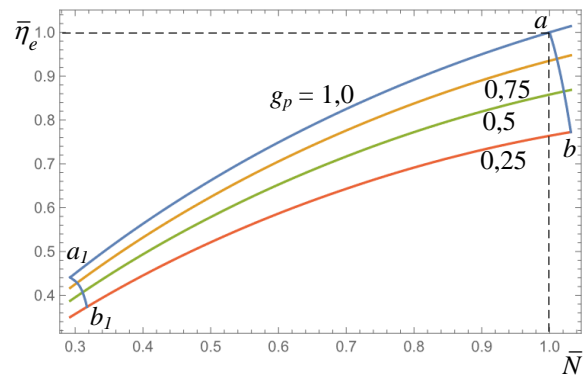


Рис. 10 – Зависимость относительного КПД $\bar{\eta}_e$ от относительной мощности \bar{N} при различных значениях g_p для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р

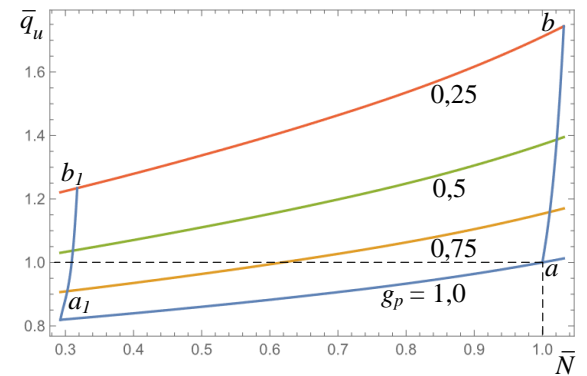


Рис. 11 – Зависимость относительной теплоты \bar{q}_u , переданной на теплоснабжение от относительной мощности \bar{N} при различных значениях g_p для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р

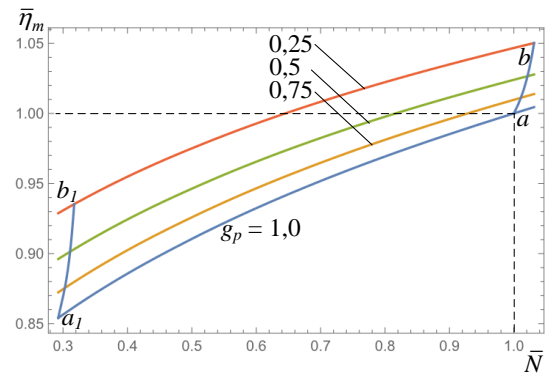


Рис. 12 – Зависимость относительного теплотехнического КПД $\bar{\eta}_m$ от относительной мощности \bar{N} при различных значениях g_p для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р

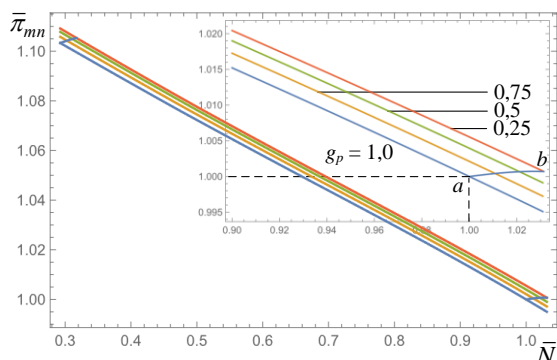


Рис. 13 – Зависимость относительной степени расширения турбины перерасширения $\bar{\pi}_{mn}$ от относительной мощности \bar{N} при различных значениях g_p для на базе МГТУ ПЦ+ТКУ+Р

Следует отметить, что снижение относительной теплоты при уменьшении относительной мощности связано с поведением параметров ТКУ, а именно степени расширения турбины перерасширения $\bar{\pi}_{mn}$. При генераторном режиме нагружения на частичных нагрузках происходит увеличение расхода воздуха через ГТД, а ТКУ представляет собой турбокомпрессор, соединенный с силовой турбиной только газопроводом, то в соответствии с типовыми характеристиками турбокомпрессора (ТК) с ростом расхода воздуха возрастает и степень повышения давления в компрессоре ТК, а следовательно, и степень расширения турбины.

На рис. 13 показана зависимость $\bar{\pi}_{mn}$, от \bar{N} при различных значениях g_p для ТКУ. Анализ рис. 13 показывает рост степени расширения турбины перерасширения при снижении относительной мощности, что, в свою очередь, приводит к снижению температуры газов перед регенератором, и, как следствие, снижению температуры газов на входе в ОГ1 и соответственно относительной теплоты, переданной на теплоснабжение.

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. Таким образом использовать байпасирование воздуха мимо регенератора для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р целесообразно при нагрузках близких к номинальным, в то время как для МГТУ на базе ПЦ+Р – во всем диапазоне нагружения.

Заключение

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

1. Относительная теплота, переданная на теплоснабжение, возрастает, а КПД установок падает с понижением относительного расхода воздуха через регенератор при любой нагрузке.

2. Для МГТУ на базе ПЦ+Р относительная теплота, переданная на теплоснабжение, возрастает с понижением относительного расхода воздуха через регенератор и практически не зависит от относительной мощности, а для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р относительная теплота, переданная на теплоснабжение, возрастает с понижением относительного расхода воздуха через регенератор и снижается при уменьшении относительной мощности.

3. Использование байпасирования воздуха мимо регенератора для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р целесообразно при нагрузках близких к 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 увеличивается с понижением относительного расхода воздуха через регенератор и уменьшается с понижением мощности, однако колебания его не очень значительны, особенно для МГТУ на базе ПЦ+Р, что говорит о высокой эффективности использования топлива.

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. Долгоглоня А.В. Управление генерацией тепла в циклах микрогазотурбинных установок с регенерацией теплоты / А.В. Долгоглоня, 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. 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. Ochretianjy // 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. Вараксин, 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 utilizaciya 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 // Procecoligs 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. Ochretianjy // 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 // Procecoling 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. 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. Optimizaciya stepeni regeneracii 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 kogeneracionnyh 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. науч. tr. Har'kov: NAU «ХАИ», 2001 Vyp. 23 S. 95-98.
13. Perekhodnye processy v gazoturbinyh ustanovkah [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 zamknytyh 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). Т.1. С. 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, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт природно-технических систем, 299011, Севастополь, Ленина, 28, e-mail: dologlonyan@mail.ru

Валерий Тимофеевич Матвеев, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природно-технических систем, 299011, Севастополь, Ленина, 28, e-mail: mvt3900@mail.ru

Александр Георгиевич Клименко, ведущий инженер, Институт природно-технических систем, 299011, Севастополь, Ленина, 28, e-mail: kag195877@gmail.com

Andrey V. Dologlonyan, Ph.D. (Eng), assistant professor, Leading Researcher, chief of laboratory, Institute of Nature and Technical Systems, Lenina St., 28, Sevastopol, 299011, Russian Federation, e-mail: dologlonyan@mail.ru

Valeriy T. Matviienko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Institute of Nature and Technical Systems, Lenina St., 28, Sevastopol, 299011, Russian Federation, e-mail: mvt3900@mail.ru

Alexander G. Klimenko, chief engineer, Institute of Nature and Technical Systems, Lenina St., 28, Sevastopol, 299011, Russian Federation, e-mail: kag195877@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 18.01.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 14.02.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 22.02.2023.

Научная статья

УДК 621.914

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.015>

Экспериментальное исследование динамических характеристик роторов судовых турбогенераторов с опорами на газовой смазке

А.В. Нитяговский¹ nitiagovsky@yandex.ru, М.В. Грибиниченко¹ gribinichenko.mv@dvfu.ru,
О.С. Портнова¹ olesya.portnova@mail.ru, Ю.А. Лапин¹ yuralapin.98@mail.ru.

¹Дальневосточный федеральный университет

Аннотация. В статье приводится решение задачи по подтверждению адекватности математической модели, разработанной для исследования динамики роторов на газовых опорах. Газовые подшипниковые опоры имеют многочисленные преимущества перед гидродинамическими подшипниками, работающими на масле. В их число входит повышение механического КПД, повышение надёжности агрегата (ввиду отсутствия системы смазки) и многие другие. Однако газовые опоры имеют повышенные требования к точности изготовления подшипниковых узлов, что усложняет выполнение виброналадки роторов судовых турбогенераторов на таких опорах. В связи с этим, данное исследование направлено на повышение точности определения критических частот роторов турбогенераторов на податливых газовых опорах при проектировании. Для того, чтобы подтвердить адекватность результатов, получаемых с помощью математической модели ротора на податливых газовых опорах, был проведён эксперимент на лабораторной установке. Была получена зависимость первой критической частоты исследуемого ротора от давления наддува в подшипниках для реальной системы. Приведено сравнение результатов физического эксперимента и результатов расчёта при помощи математической модели..

Ключевые слова: Динамика роторов, критические частоты, газодинамические опоры

Для цитирования: 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 часть 1, С. 129—133. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.015

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.015>

Experimental study of dynamic characteristics of rotors of marine turbogenerators with gas-lubricated supports

Andrei V. Nitiagovskii¹ nitiagovsky@yandex.ru, Matvey V. Gribinichenko¹ gribinichenko.mv@dvfu.ru,
Olesya S. Portnova¹ olesya.portnova@mail.ru, Yury A. Lapin¹ yuralapin.98@mail.ru.

¹Far Eastern Federal University

Abstract. The article provides a solution to the problem of confirming the adequacy of a mathematical model developed to study the dynamics of rotors on gas supports. Gas bearings have many advantages over hydrodynamic bearings running on oil. These include an increase in mechanical efficiency, an increase in the reliability of the unit (due to the lack of a lubrication system) and many others. However, gas supports have increased requirements for the accuracy of manufacturing bearing assemblies, which complicates the implementation of vibration adjustment of the rotors of marine turbogenerators on such supports. In this regard, this study is aimed at improving the accuracy of determining the critical frequencies of turbogenerator rotors on malleable gas supports during design. In order to confirm the adequacy of the results obtained using a mathematical model of a rotor on malleable gas supports, an experiment was carried out on a laboratory installation. The Article provides with obtained dependence of the first critical frequency of the studied rotor on the boost pressure in the bearings for a real system and a comparison of the results of a physical experiment and the results of calculation using a mathematical model.

Key words: Rotordynamics, critical frequencies, gas bearings

For citation: Andrei V. Nitiagovskii, Matvey V. Gribinichenko, Olesya S. Portnova, Yury A. Lapin. Experimental study of dynamic characteristics of rotors of marine turbogenerators with gas-lubricated supports, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 129—133. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.015

Введение

Использование газовых подшипников позволяет создавать высокооборотные турбогенераторы с высокой удельной мощностью и меньшими (по сравнению с традиционными машинами с жидкостными опорами) массо - габаритными показателями. Это преимущество особенно актуально для транспортной энергетики, в том числе для судовой. На морских и речных судах, в условиях ограниченного пространства, уменьшение массо -

габаритных показателей является одной из наиболее важных задач [6,8].

Податливость опор ротора может оказывать значительное влияние на положение его критических частот. В связи с этим расчётам коэффициентов жёсткости (податливости) опор роторов придают большое значение [2,3,4,5,7]. В некоторых случаях даже проектируют системы управления жёсткостью опор в целях смещения критических частот в сторону от рабочих и снижения вибрации при работе механизма [5].

В случае применения газовых подшипников, одним из наиболее существенных факторов, влияющих на положение критических частот ротора является податливость его опор. Это объясняется тем, что диапазон изменения податливости у газовых подшипников значительно выше чем у жидкостных, в силу сжимаемости газов [9, 10].

Точное определение критических частот роторов с опорами на газовой смазке позволит обеспечить качественное проектирование системы ротор-газовые опоры и является актуальной задачей [2].

Целью настоящей исследовательской работы является разработка методики, позволяющей с необходимой точностью определять динамические характеристики системы ротор-газовые опоры при проектировании судовых турбогенераторов.

В работе проводится численный и физический эксперименты. Для исследования влияния параметров газовых опор на критическую частоту системы ротор - подшипники был проведён численный эксперимент, а для подтверждения адекватности полученных результатов проведен физический эксперимент.

Настоящая статья посвящена описанию физического эксперимента.

Описание стенда

Физический эксперимент проведен с помощью стенда, моделирующего систему ротор-газовые подшипники судового турбогенератора.

Принципиальная схема стенда показана на рисунке 1. Общий вид стенда показан на рис.2.

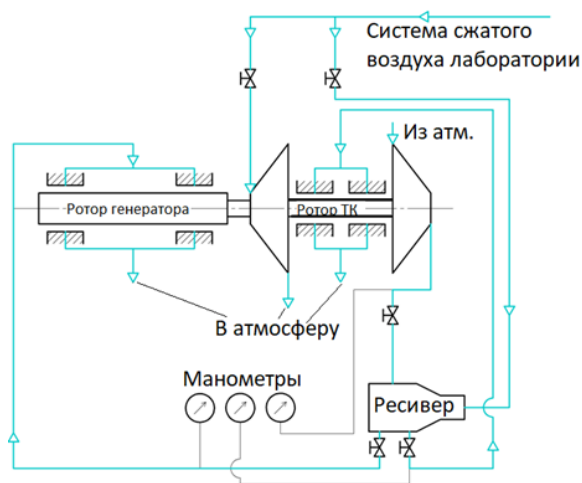


Рис. 1. Принципиальная схема стенда

Лабораторный стенд спроектирован так, чтобы смоделировать конструкцию турбогенератора с газовой турбиной. Он представляет из себя соединённые друг с другом модифицированный турбокомпрессор ТКР 8,5 и изготовленный ротор, моделирующий ротор генератора. Оба ротора вращаются в газовых подшипниках.

Для обеспечения несущей способности газовых подшипников турбокомпрессора, в корпусе турбокомпрессора были расточены отверстия под подшипниковую втулку большего диаметра, а на вал напрессована втулка для увеличения внешнего диаметра вала. Компоновка экспериментального стенда представлена на рис.3.

Приведение ротора установки в движение производится за счёт работы газовой турбины турбокомпрессора ТКР 8,5. В качестве рабочего тела для турбины используется воздух от системы сжатого воздуха лаборатории. После расширения в турбине, воздух выходит в атмосферу. Для компенсации неравномерности давления воздуха в системе лаборатории, перед газовыми подшипниками установлен ресивер. Также в этот ресивер поступает воздух, нагнетаемый центровкой ротора турбокомпрессора и ротора турбогенератора, под корпусом генератора установлена центровочная платформа. Эта платформа закреплена на центровочных винтах, перемещением которых можно регулировать положение пластины и генератора по отношению к турбокомпрессору.

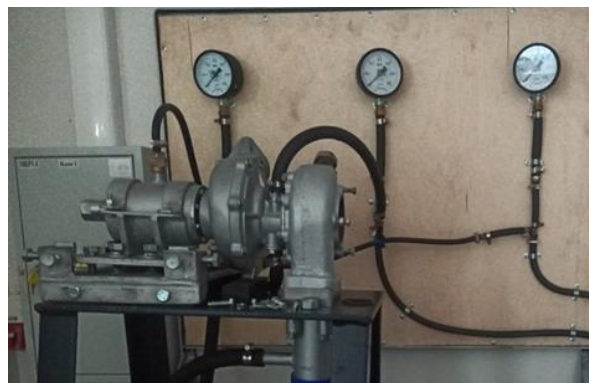


Рис. 2. Общий вид стенда

Проведение эксперимента

Для подтверждения адекватности результатов, полученных при помощи численного эксперимента, на разработанном стенде был проведён опыт по определению первой критической частоты вращения в зависимости от давления наддува P_s .

Измеряемые параметры.

В процессе проведения эксперимента измерялись следующие параметры:

Давление наддува P_s , Мпа;

Виброускорение на частоте вращения ротора, m/s^2 ;

Фаза вибрации на частоте вращения ротора, град.

Проведение измерений

Для измерения давления наддува P_s использовались манометры, имеющие диапазон измерения 0,6 МПа и класса точности 1,5.

Измерение амплитуды и фазы вибрации проводилось при помощи акселерометра и частотомера, подключенных в многоканальный анализатор вибрации фирмы Bruel & Kjaer, модель 3560B.

Определение критической частоты ротора производилось по амплитуде и фазе вибрации, записанных синхронно. О проходе через критическую частоту свидетельствовал рост вибрации, а также изменение фазы на 160-180 градусов [1].

Всё оборудование было поверено перед проведением измерений.

Методика проведения эксперимента

Эксперимент проводился следующим образом:

1 Перед началом эксперимента ротор лежал в подшипниках неподвижно, воздух на подшипники и турбину не поступает;

2 Подавался воздух на подшипники, чтобы при помощи давления наддува снизить частоту всплывания ротора;

3 Подавался воздух на турбину, ротор начинал разгоняться;

4 Ротор разгонялся до частоты вращения 70000 об/мин, давление наддува устанавливалось до требуемой постоянной величины, контроль давления наддува производился по соответствующему манометру;

5 Запускался виброанализатор, прекращалась подача воздуха на турбину;

6 В процессе выбега ротора велась запись амплитуды и фазы составляющей вибрации на частоте вращения, до полной остановки ротора;

7 Прекращалась подача воздуха на газовые подшипники, пока компрессоры лаборатории накачивали воздух в баллоны до первоначального значения;

8 Пункты 1-7 повторялись 5 раз;

9 Пункты 1-8 выполнялись для значений давления наддува от 0,05 до 0,5 МПа с шагом 0,05 МПа.

Обсуждение результатов и выводы

В результате проведения эксперимента получена зависимость критической частоты системы ротор - подшипники исследуемого стенда от давления наддува газовых подшипников.

Результаты численного и физического эксперимента сведены в график и показаны на рис. 4.

Значения критической скорости ротора, полученные при помощи физического эксперимента,

не выходили за пределы доверительного интервала во всём диапазоне измерений

Как видно из графика, тенденция изменения положения критической частоты в зависимости от давления наддува сохраняется одинаковой по данным численного и физического экспериментов. Во всём исследуемом диапазоне расхождение теоретических и опытных данных не превышает 10%. Более высокая сходимость результатов наблюдается при более высоких давлениях наддува.

Также из графика видно, что расчётные данные несколько завышены по сравнению с экспериментальными на 5-10%. Такое расхождение может быть обусловлено несколькими факторами:

- Некоторое отклонение геометрии конструкции подшипниковых узлов;
- Принятые в расчёте допущения;

- «Запаздывание» вибрации. Авторы предполагают, что на таких высоких скоростях (свыше 30000 об/мин) при свободном выбега пик вибрации, зафиксированной акселерометром, может находиться на более низкой частоте ввиду резкого снижения частоты вращения.

Также на основании данного опыта можно сделать вывод о том, что для исследования динамики роторов целесообразно использовать более податливые роторы в целях снижения критических частот вращения и удобства их исследования.

Заключение

Анализируя полученные экспериментальные данные, можно сделать вывод, что задача подтверждения адекватности результатов, получаемых с помощью численного эксперимента, выполнена.

Полученные данные будут использоваться при проведении дальнейших исследований в области динамики роторов на газовых опорах.

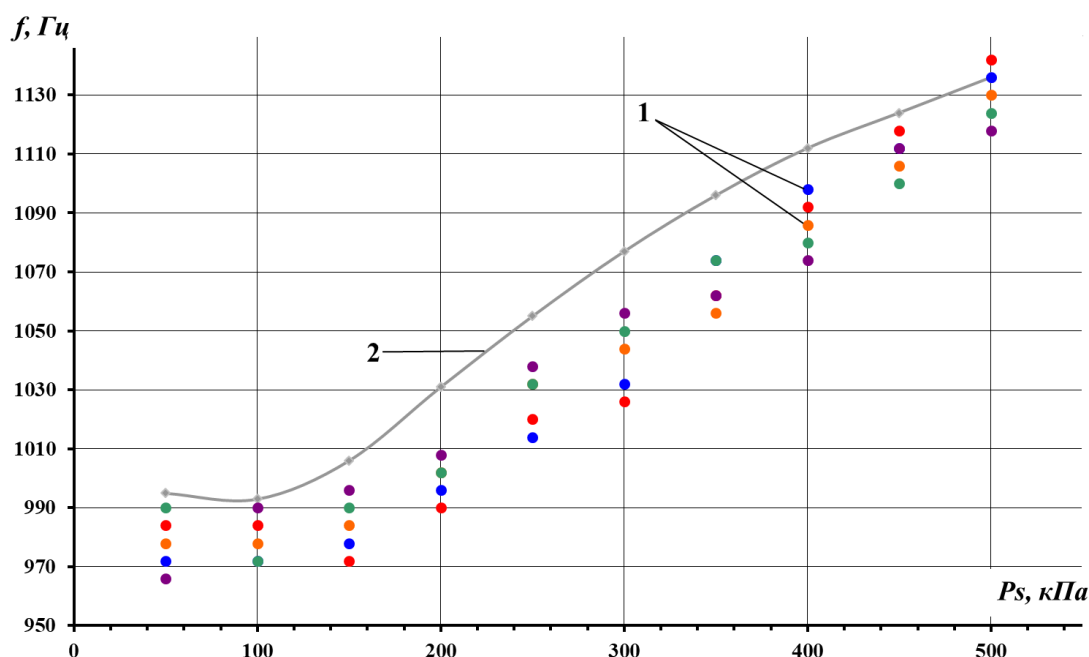


Рис. 3. зависимость первой критической частоты ротора от давления наддува P_s
1-экспериментальные данные; 2- расчетные значения критической частоты;

Литература

- 1 Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: учебное пособие. СПб: Изд.центр СПбМГТУ, 200. 159с.
- 2 Биргер И.А., Шор Б.Ф. Динамика авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1981. – 232с.
- 3 Давыдов Д. П. Формирование моделей динамики ротора, рабочих колес компрессора и турбины [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие. М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (14 Мб). - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (DVD-ROM).
- 4 Леонтьев М.К., Терешко А.Г., Исследование характеристик упругих колец в опорах роторов газотурбинных двигателей, Вестник Московского авиационного института № 3, 2011., т. 18. с. 135-146
- 5 Леонтьев М.К., Фомина О.Н. Активное управление жесткостью опорных узлов роторов. Конструкция и статический анализ, Вестник Московского авиационного института № 4, 2007. с. 57-62
- 6 Нитяговский А.В., Грибиниченко М.В., Лапин Ю.А. Влияние податливости опор на критические частоты вращения роторов. Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума НАУКА И ИННОВАЦИИ – СОВРЕМЕННЫЕ КОНЦЕПЦИИ (г. Москва, 29 июля 2022 г.). 2022. с. 150-154.
- 7 Пирогова Н.С., Тараненко П.А. Расчетно-экспериментальный анализ собственных и критических частот и форм высокооборотного ротора микрогазотурбинной установки. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение №3 Т15, 2015., т 15. с. 37-47.
- 8 Самсонов, А. И. Подшипники с газовой смазкой для турбомашин: монография Владивосток – ДВГТУ, 2009. 292 с.
- 9 O.D. Santiago, L. Andreas. Experimental identification of bearing dynamic force coefficients in a flexible rotor – further developments. U.S, Tribology and lubrication technology, June 2007. P 42-52
- 10 T. H. Kim, L. Andres, J. Nourse, J.L. Wade, D.R. Lubel. Modeling of a gas foil bearings for microturbine applications: Prediction versus experimental stiffness and damping force coefficients. World Tribology Congress 2009.

References

- 1 Barkov A.V., Barkova N.A., Azovcev A.Yu. Monitoring I diagnostika rotornih machin po vibratsii: uchebnoe posobie [Monitoring and diagnostics of rotary machines by vibration: textbook]. SPb: Publ. center SPbMGU, 200. 159p.
- 2 Birger I.A., Shor B.F. Dinamika aviatsionnyh gazoturbinnih dvigateley. M.: Mashinostroenie, 1981. – 232 p.
- 3 Davydov D.P. Formirovaniye modeley dinamiki rotora, rabochih kolyos kompressora I turbiny [Electronniy resurs]: elektronnoe uchebnoe posobie. M-vo obrazovaniya I nauku RF, Samar. gos. aerocosm. Un-t im. S.P. Korolyova (nats. Issl. In-t). Electron. tekst I graf. dannye. (14 Mb). – Samara, 2013. – 1 el. opt. disc (DVD-ROM).
- 4 Leontyev M.K., Tereshko A.G. Issledovaniye harakteristik uprugih kolets v oporah rotorov gazoturbinnih dvigateley, Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta, №3, 2011., т 18, p. 135-146.
- 5 Leontyev M.K., Fomina O.N. Aktivnoye upravleniye zjostkostyu opornyh uzlov rotorov. Konstruktsiya I staticheskiy analiz. Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta, №4, 2007., p. 57-62.
- 6 Nityagovskiy A.V., Gribinichenko M.V., Lapin Yu.A. Vliyanie podatlivosti opor na kriticheskie chastoti vrascheniya rotorov. Sbornik nauchnih statei po itogam raboti Mezjdunarodnogo nauchnogo foruma NAUKA I INNOVACII – SOVREMENNIE KONCEPCII (g. Moskva, 29 Iulya 2022 g) [The influence of the pliability of the supports on the critical rotational speeds of the rotors. Collection of scientific articles based on the results of the International Scientific Forum SCIENCE AND INNOVATION – MODERN CONCEPTS (Moscow, July 29, 2022)]. 2022. p. 150-154.
- 7 Pirogova N.S., Taranenko P.A. Raschyotno – eksperimentalniy analiz sobstvennyh kriticheskikh chastot I form vysokooborotnogo rotora mikrogazoturbinnoy ustanovki. Vestnik Yuzjno – Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya – Mashinostroeniye. №3 T 15, p. 37-47.
- 8 Samsonov, A. I. Podshipniki s gazovoi smazkoi dlya turbomaschin: monografiya [Gas-lubricated bearings for turbomachines: monograph]. Vladivostok – DVGU, 2009. 292 pd.
- 9 O.D. Santiago, L. Andreas. Experimental identification of bearing dynamic force coefficients in a flexible rotor – further developments. U.S, Tribology and lubrication technology, June 2007. P 42-52
- 10 T. H. Kim, L. Andres, J. Nourse, J.L. Wade, D.R. Lubel. Modeling of a gas foil bearings for microturbine applications: Prediction versus experimental stiffness and damping force coefficients. World Tribology Congress 2009.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ О Б АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Валерьевич Нитяговский, Директор Дальневосточного филиала АО «Научно-исследовательское проектно-технологическое бюро «ОНЕГА». nitiagovsky@yandex.ru

Andrei V. Nitiagovskii, Deputy Director – Chief Engineer of the Far Eastern Branch of JSC ONEGA Research Design and Technology Bureau. nitiagovsky@yandex.ru

Юрий Алексеевич Лапин, аспирант отделения Машиностроения, морской техники и транспорта Дальневосточный федеральный университет Россия, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10., e-mail: yuralapin.98@mail.ru

Yury A. Lapin, graduate student, Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922, e-mail: yuralapin.98@mail.ru

Олеся Сергеевна Портнова, кандидат технических наук, доцент отделения Машиностроения, морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10., e-mail: olesya.portnova@mail.ru

Olesya S. Portnova, Ph.D. (Eng) assistant professor Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport, 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922, Russia, e-mail: fershalovjuriy@mail.ru

Матвей Валерьевич Грибиниченко, кандидат технических наук, доцент отделения Машиностроения, морской техники и транспорта Дальневосточный федеральный университет Россия, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10., e-mail: gribinichenko.mv@dvfu.ru

Matvey V. Gribinichenko, Ph.D. (Eng), assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922, e-mail: gribinichenko.mv@dvfu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.12.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.02.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 20.02.2023.

Научная статья

УДК 66.074.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.016>

Очистка водорода для реакции на низкотемпературных топливных элементах подводных аппаратов

А.Н. Дядик¹ dyadik@rambler.ru, Д. С. Маловик¹ dimamalovik@gmail.com

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Статья посвящена вопросам удаления углекислого газа на подводных аппаратах, оснащенных энергетической установкой на основе низкотемпературных топливных элементов (ТЭ). С целью достижения данной задачи рассмотрены варианты удаления диоксида углерода из рабочего газа методами абсорбции и адсорбции. Установлено, что в качестве абсорбента может быть использована заборная вода благодаря высокой растворимости диоксида углерода. Получены зависимости на основе физико-химических процессов, имеющих место в объеме абсорбера. Установлено, что процесс абсорбции углекислого газа жидкостью происходит за счет разности концентраций углекислого газа в пузырьке и окружающей жидкости, по этой причине требуется определение поверхности массообмена, состоящей из суммы поверхностей всех газовых пузырьков в объеме абсорбера для определения эффективности абсорбера. Для повышения степени очистки водорода и его осушки после абсорбера может быть использована адсорбция цеолитами.

Ключевые слова: абсорбция, абсорбер, электрохимический генератор, топливный элемент, риформинг, водород, синтез-газ, диоксид углерода, оксид углерода.

Для цитирования: Дядик А.Н., Маловик Д.С. Очистка водорода для реакции на низкотемпературных топливных элементах подводных аппаратов. 2023. № 1 часть 1, С. 134—138. DOI:10.37220/MIT.2023.59.1.016

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.016>

Purification of hydrogen for reaction on low-temperature fuel elements of underwater vehicles

Aleksandr N. Dyadik¹ dyadik@rambler.ru, Dmitry S. Malovik¹ dimamalovik@gmail.com

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the issues of carbon dioxide removal on underwater vehicles equipped with a power plant based on low-temperature fuel cells (FC). To achieve this goal, options for removing carbon dioxide from the working gas by absorption and adsorption methods are considered. It has been established that seawater can be used as an absorbent due to the high solubility of carbon dioxide. On the basis of physico-chemical processes occurring in the volume of the absorber, the dependences are obtained. It is established that the process of carbon dioxide absorption by a liquid occurs due to the difference in the concentrations of carbon dioxide in the bubble and the surrounding liquid, for this reason, it is necessary to determine the mass transfer surface consisting of the sum of the surfaces of all gas bubbles in the volume of the absorber to determine the effectiveness of the absorber. For increase the degree of purification of hydrogen and its drying after the absorber, adsorption with zeolites can be used.

Key words: absorption, absorber, electrochemical generator, fuel cell, reforming, hydrogen, synthesis gas, carbon dioxide, carbon monoxide.

For citation: Aleksandr N. Dyadik, Dmitry S. Malovik. Purification of hydrogen for reaction on low-temperature fuel elements of underwater vehicles. 2023. № 1 part 1, P. 134—138. DOI:10.37220/MIT.2023.59.1.016

Введение

В перспективных энергоустановках, использующих низкотемпературные топливные элементы, предполагается получение водорода риформингом дизельного топлива. В процессе риформинга газ помимо водорода содержит оксид и диоксид углерода, а также серу, поэтому требует очистки. В качестве основного элемента системы очистки рабочего газа от примеси углекислого газа служит абсорбер, являющийся частью топливного процессора энергетической установки. Удаление углекислого газа (CO₂) производится в абсорбере путем его растворения в заборной воде. При этом по многочисленным литературным данным предполагается пузырьковое движение газожидкостной смеси в объеме абсорбера. Характеристики этой смеси определяются исходя из

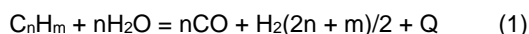
ее температуры, давления и относительного содержания составляющих газа.

1. Проблемы риформинга углеводородного топлива при получении водорода

Транспортные энергоустановки с водородом в качестве топлива являются перспективными, ввиду высокой массовой энергетической плотности водорода [1, 3]. Водород представляет интерес в качестве горючего в составе водородно-воздушных смесей, однако процессы горения смесей недостаточно изучены [2]. Наиболее отработанным является преобразование химической энергии топлива и окислителя в электрическую, на топливных элементах, образующих электрохимический генератор. Использование кислорода в качестве окислителя и его криогенное хранение является хорошо отработанным [3]. Особенностью

использования водорода в транспортных энергоустановках является необходимость разработки систем аккумулирования, вызванная низкой энергетической плотностью водорода [3]. Перспективным является хранение водорода в связанном виде, и генерация непосредственно на борту методом риформинга углеводородного топлива [3, 4].

Риформинг углеводородного топлива – это получение газа конверсией углеводородов разными окислителями (CO₂, H₂O, O₂, воздух и их смеси). В промышленности конверсия метана и его гомологов является основным промышленным методом получения водорода. Процесс конверсии в общем виде протекает по следующей реакции [5]:



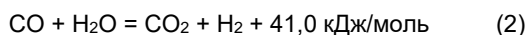
В составе, получаемого в результате реакции (1) синтез-газа, кроме водорода содержится сажа (углерод), оксид и диоксид углерода [5]. Для снижения выбросов оксидов углерода, в объеме реакционной зоны необходимо поддерживать оптимальную температуру [6].

Преимуществом системы получения водорода на основе риформинга является высокий массовый выход водорода, составляющий в зависимости от вида топлива от 14 до 20 %, что снижает габариты системы [7].

Предпочтительным для транспортных энергоустановок является использование твердполимерных ТЭ из-за низкой рабочей температуры и возможности запуска без предварительного разогрева [7,8]. К низкотемпературным ТЭ относятся твердполимерные и щелочные.

Особенностью использования низкотемпературных ТЭ является карбонизация электролита, вносящая вклад в деградацию вольтамперной характеристики ТЭ. Процесс карбонизации щелочных матричных элементов наиболее подробно рассмотрен в литературе [8]. Для предотвращения карбонизации электролита целесообразна предварительная подготовка синтез-газа с удалением оксида и диоксида углерода.

В промышленности для удаления оксида углерода применяют паровую конверсию по реакции:



В результате реакции происходит выделение дополнительного водорода и одновременное окисление оксида углерода до диоксида углерода.

Диоксид углерода из продуктового газа может удаляться рядом методов, из которых можно выделить удаление в абсорбере и с применением цеолитов.

Удаление газа жидким поглотителем в абсорбере, основано на растворимости диоксида углерода в растворителях. Метанол является хорошим поглотителем углекислого газа, однако основными недостатками для транспорта являются громоздкость оборудования [9], высокая токсичность и способность образовывать с воздухом пожаровзрывоопасные смеси [10]. В качестве поглотителя может выступать вода, при давлении 0,13 МПа и температуре 20°C, коэффициент растворимости для диоксида углерода и водорода будет равен 0,879 м³/м³ и 0,018 соответственно [11].

Растворимость углекислого газа в пресной воде при различных давлениях и температурах представлена на рисунке 1 [12].

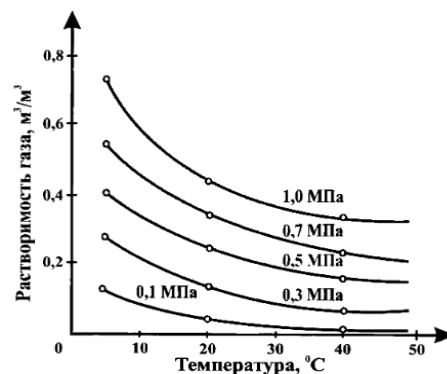


Рис. 1. Зависимость растворимости углекислого газа в пресной воде от температуры

При использовании в качестве абсорбента морской воды, с ростом минерализации снижается растворимость газов по закону Сеченова, математическое выражение имеет следующий вид:

$$c(X) = c_0(X) \cdot 10^{K_c \cdot c_s} \quad (3)$$

где $c(X)$ – растворимость газа в присутствии электролита; $c_0(X)$ – растворимость газа в чистом растворителе; K_c – коэффициент растворимости [13].

Коэффициент растворимости газов, для установления значения растворимости используется поправочный коэффициент, зависящий от минерализации, представленный на рисунке 2 [12].

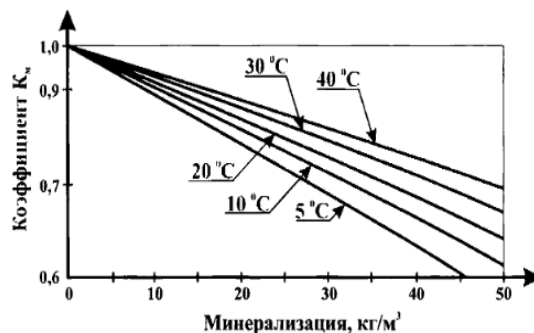


Рис. 2. Значение поправочного коэффициента в зависимости от минерализации воды

Основными преимуществами воды в качестве абсорбента является доступность воды, простота конструкции установки, меньшая опасность утечки газа в сравнении с метанолом.

2. Зависимости для расчета пузырькового режима движения смеси в абсорбере

В абсорбере реализуется пузырьковый режим движения газожидкостной смеси. Для расчета скорости всплытия деформированных пузырьков, в предположении о независимости скорости всплытия v_b от диаметра всплывающих пузырьков (при $Re > 600$), наиболее близкое совпадение с экспериментальными данными дает использование зависимости:

$$v_{п} = 1,01 \left(\frac{\sigma_{ж}^2}{\mu_{ж} \rho_{ж}} \right)^{0,2} \quad (4)$$

где $\sigma_{ж}$ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м; $\mu_{ж}$ – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·с; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости (для морской воды $\sim 1025 \text{ кг/м}^3$).

При струйном режиме истечения газа из отверстия отрывной диаметр пузырьков зависит только от объемного расхода и рассчитывается по зависимости:

$$d_{п} = \sqrt{\frac{6V_{г}}{\pi v_{п}}} \quad (5)$$

где $V_{г}$ – объемный расход газа, $\text{м}^3/\text{с}$.

После подстановки (4) в (5), получим окончательную зависимость для определения диаметра газового пузырька, отрывающегося от отверстия распылителя:

$$d_{п} = 1,38 \sqrt{\frac{V_{г}}{\left(\frac{\sigma_{ж}^2}{\mu_{ж} \rho_{ж}} \right)^{0,2}}} \quad (6)$$

Определение физических констант жидкости должно производиться в функции температуры и давления в абсорбере, которое задается в исходных данных к расчету, а температура газожидкостной смеси в объеме сатуратора определяется по уравнению теплового баланса:

$$T_{см} = x \frac{C_p^г}{C_{см}^г} T_{г} + (1-x) \frac{C_p^ж}{C_{см}^ж} T_{ж} \quad (7)$$

где $T_{г}$ и $T_{ж}$ – температуры поступающих в объем абсорбера газов и жидкости в кельвинах, входящие в исходные данные расчетной модели; x – массовое расходное газосодержание; $C_p^г$, $C_p^ж$, $C_{см}^г$, $C_{см}^ж$ – изобарные теплоемкости газа, жидкости и смеси, кДж/(кг·К).

Если с изобарной теплоемкостью воды $C_p^ж$ все ясно, то с газом и смесью более сложно. Поскольку после топливного процессора в абсорбер попадает смесь трех газов, а именно водорода H_2 , двуокиси углерода CO_2 и окиси углерода CO , то для определения изобарной теплоемкости газа, необходимо знать массовые доли каждого газа. Например, массовая доля углекислого газа будет определена по следующей формуле:

$$g_{\text{CO}_2} = \frac{G_{\text{CO}_2}}{G_{см}} \quad (8)$$

Также определяются массовые доли оставшихся двух газов. Далее по правилу аддитивности находится изобарная теплоемкость смеси газов:

$$C_p^г = g_{\text{H}_2} C_p^{\text{H}_2} + g_{\text{CO}_2} C_p^{\text{CO}_2} + g_{\text{CO}} C_p^{\text{CO}} \quad (9)$$

Изобарная теплоемкость газожидкостной смеси находится по правилу аддитивности с учетом массового расходного газосодержания:

$$C_p^{см} = x C_p^г + (1-x) C_p^ж \quad (10)$$

С увеличением размера в процессе всплывания газовый пузырек деформируется и дробится.

Критический радиус пузырька, при котором наступает его дробление, может быть определен по формуле:

$$R_{кр} = \sqrt[3]{\frac{3}{C_D} \cdot \frac{\sigma_{ж}}{v_{п}^2 \sqrt{\rho_{г} \rho_{ж}}}} \quad (11)$$

где C_D – коэффициент сопротивления.

Наиболее точное совпадение C_D и экспериментальных данных дает зависимость, учитывающая форму всплывающего пузырька:

$$C_D = \frac{4}{3} \text{Re}^{-2} \cdot \text{Mo}^{-0,5} \cdot \text{Eo}^{1,5} = 26,2 \frac{R_{п}}{v_{п}^2} \quad (12)$$

После подстановки (12) в (11) и допущении о равенстве $R_{п} = R_{кр}$, зависимость (11) примет вид:

$$R_{кр} = \frac{0,58 \sigma_{ж}^{0,75}}{v_{п}^{0,5} \rho_{г}^{0,25} \rho_{ж}} \quad (13)$$

В работе [14] установлено, что средний диаметр устойчивого пузырька в двухфазном слое может быть определен из выражения:

$$d_{ср} = \frac{\xi v_{п}^2}{2g} \quad (14)$$

где ξ – коэффициент сопротивления относительно движению пузырька, который определяется по графику, изображенному на рисунке 3.

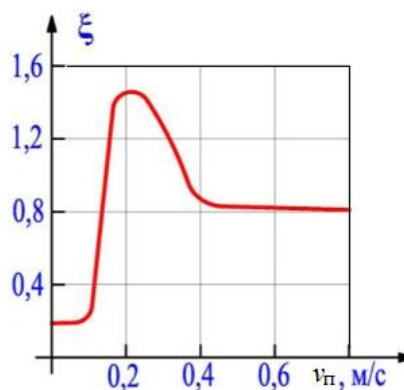


Рис. 3 – Зависимость коэффициента сопротивления от скорости всплывания пузырька

3. Очистка методом адсорбции

Для избирательного поглощения газов также применяется адсорбция. В процессах адсорбционного извлечения диоксида углерода применяются цеолиты. Цеолиты – кристаллические водные алюмосиликаты в виде гранул размером от 1,6 до 5 мм [11]. Наряду с диоксидом углерода цеолиты поглощают пары воды и одновременно с очисткой газа происходит его осушка. Регенерация цеолитов осуществляется понижением давления и повышением температуры. Преимуществом цеолитов является низкая рабочая температура и высокая степень очистки, недостатком являются высокие температуры регенерации и необходимость дегидратации [15 – 17].

Процесс адсорбции может быть использован в агрегатах, установленных после абсорбера, с целью повышения степени очистки водорода перед поступлением в топливные элементы.

Заключение

Определено, что для очистки продуктового газа в абсорбере может использоваться забортная вода благодаря высокой растворимости диоксида углерода.

Полученные в работе математические зависимости опираются на физико-химические процессы, имеющие место в объеме абсорбера. Принятый режим движения двухфазной смеси в абсорбере является пузырьковым. Установлено, что процесс абсорбции углекислого газа жидкостью

происходит за счет разности концентраций углекислого газа в пузырьке и окружающей жидкости. По этой причине требуется определение поверхности массообмена, состоящей из суммы поверхностей всех газовых пузырьков в объеме абсорбера.

Для определения эффективности абсорбера требуются дополнительные исследования.

С целью повышения степени очистки водорода и его осушки после абсорбера может быть использована адсорбция цеолитами.

Литература

1. Николаев О. С. Водород и атом водорода: справочник физических параметров. – Москва: Ленанд, 2006. – 47 с.
2. Максимычев А. В., Привезенцев С. С., Черненко Е. В. Особенности горения богатых водородно-воздушных смесей // Труды МФТИ, 2020. Том 12, №1, С. 53 – 60.
3. Дядик А. Н., Юшков А. В. Перспективы развития воздухонезависимых энергетических установок. Труды Крыловского государственного научного центра, 2021 г. №1, С. 347 – 348.
4. Ченцов М. С., Соколов В. С., Прохоров Н. С. Концепция установки получения водорода риформингом дизельного топлива в составе атмосферонезависимой энергетической установки с электрохимическими генераторами для неатомной подводной лодки. Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология», 2006 г., №11(43), С 39 – 46.
5. Коробцев С. В., Кротов М. Ф., Фатеев В. Н., Козлов С. И., Люгай С. В. Производство водорода из органического сырья. Транспорт на альтернативном топливе № 6 (36), декабрь 2013 г. стр. 10 – 14.
6. Лаптев А. Г., Конахин А. М., Минеев Н. Г. Теоретические основы и расчет аппаратов разделения гомогенных смесей. М.: Теплотехник, 2011 г. – 424 с.
7. Козлов С. И., Фатеев В. Н. Топливные элементы с твердым полимерным электролитом. Транспорт на альтернативном топливе. 2016 г., № 4 (52), С. 44 – 55.
8. Карбонизация и декарбонизация щелочных матричных топливных элементов. Кондратьев Д. Г., Матренин В. И., Овчинников А. Т., и др. Электрохимическая энергетика, 2009 г., Т. 9, №2, С. 110 – 112.
9. Ахметова В. Р., Смирнов О. В. Улавливание и хранение диоксида углерода – проблемы и перспективы. Башкирский химический журнал, 2020 г., Т. 26, №3, С. 103 – 116.
10. ГОСТ 222-95. Метанол технический. Технические условия.
11. Гидрогенизационные процессы в нефтепереработке / Д.И. Орочко, А.Д. Сулимов, Л.Н. Осипов. – М.: Химия, 1971 г. – 352 с.
12. Переработка нефти. ИТС 30. –2017 г. – 643 с.
13. Переверзева С. А., Коносавский П. К., Тудвачев А. В., Хархордин И. Л. Захоронение промышленных выбросов углекислого газа в геологические структуры. – 2014 г. Сер. 7, Вып. 1, – С. 5 – 21.
14. Испытания с имитацией эксплуатационных условий подачи криогенных компонентов топлива при отработке ракетных двигательных установок / Бершадский В. А. – диссертация на соискание уч. степени д.т.н. Сергиев Посад. НИИХИММАШ, 2001. – 256 с.
15. Дегтярев, А. В. Катализаторы на блочных носителях для окисления СО / А. В. Дегтярев, М. А. Кича // Сборник тезисов VI Научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) "Неделя науки-2016", Санкт-Петербург, 30 марта 2016 года / Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет). – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 2016. – С. 113. – EDN YTVJZJ.
16. Дегтярев, А. В. Катализаторы для очистки воздуха от СО / А. В. Дегтярев, М. А. Кича // Материалы научной конференции "Традиции и инновации", посвященной 188-й годовщине образования Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), Санкт-Петербург, 01–02 декабря 2016 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 2016. – С. 99. – EDN YTXFAL.
17. Кобзарь Ю. Н., Алехина М. Б. Влияние предварительной подготовки цеолитов на их адсорбционные свойства по диоксиду углерода. Успехи в химии и химической технологии, 2007 г. – С 72-74.

References

1. Nikolaev O. S. Hydrogen and the hydrogen atom: handbook of physical parameters. Moscow: Lenand, 2006, 47 p.
2. Maksimychev A.V., Priezentssev S. S., Chernenko E. V. Features of combustion of rich hydrogen-air mixtures. Proceedings of Moscow institute of physics and technology, 2020, Vol. 12, №1, p. 53 – 60.
3. Dyadik A. N., Yushkov A.V. Prospects for the development of air-independent power plants. Proceedings of the Krylov State Scientific Center, 2021, №1, p. 347 – 348.
4. Chentsov M. S., Sokolov V. S., Prokhorov N. S. The concept of a hydrogen production unit by reforming diesel fuel as part of an atmosphere-independent power plant with electrochemical generators for a non-nuclear submarine. International Scientific Journal "Alternative Energy and Ecology", 2006, №11 (43), p. 39 – 46.

5. Korobtsev S. V., Krotov M. F., Fateev V. N., Kozlov S. I., Lugai S. V. Production of hydrogen from organic raw materials. *Alternative fuel transport*. № 6 (36), december 2013, p. 10 – 14.
6. Laptev A. G., Konakhin A.M., Mineev N. G. Theoretical foundations and calculation of devices for separation of homogeneous mixtures. Moscow: Teplotekhnika, 2011, 424 p.
7. Kozlov S. I., Fateev V. N. Fuel cells with solid polymer electrolyte. *Alternative fuel transport*. 2016. № 4 (52), p. 44 – 55.
8. Kondratiev D. G., Matrenin V. I., Ovchinnikov A. T. Carbonation and decarbonization of alkaline matrix fuel cells. *Electrochemical power engineering*. 2009. Vol. 9, №2, p. 110 – 112.
9. Akhmetova V. R., Smirnov O. V. Carbon dioxide capture and storage – problems and prospects. *Bashkir Chemical Journal*, 2020, Vol. 26, №3, p. 103 – 116.
10. GOST 222-95. Technical methanol. Technical conditions.
11. Orochko D.I., Sulimov A.D., Osipov L.N. Hydrogenation processes in oil refining. M.: Chemistry, 1971, 352 p.
12. Oil refining. *ITS* 30, 2017, 643 p.
13. Pereverzeva S. A., Konosavsky P. K., Tudvasev A.V., Kharkhordin I. L. Burial of industrial carbon dioxide emissions into geological structures. 2014, Ser. 7, Issue. 1, p. 5 – 21.
14. Bershadsky V. A. Tests with simulation of operational conditions for the supply of cryogenic fuel components during the development of rocket propulsion systems. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Sergiev Posad. NIICHIMMASH, 2001, 256 p.
15. Degtyarev A.V., Kicha M. A. Catalysts on block carriers for CO oxidation. Collection of abstracts of the VI Scientific and Technical Conference of students, postgraduates and young scientists (with international participation) "Science Week-2016", St. Petersburg, March 30, 2016, St. Petersburg state Technological Institute (technical university). Saint Petersburg: Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University), 2016, p. 113. EDN YTVZVJ.
16. Degtyarev A.V., Kicha M. A. Catalysts for air purification from CO. Materials of the scientific conference "Traditions and innovations" dedicated to the 188th anniversary of the formation of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), St. Petersburg, December 01–02, 2016, Saint Petersburg: Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University), 2016, p. 99. EDN YTXFAL.
17. Kobzar Yu. N., Alyokhina M. B. Influence of preliminary preparation of zeolites on their adsorption properties by carbon dioxide. *Advances in chemistry and chemical technology*, 2007, p. 72-74.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Николаевич Дядик, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплофизических основ судовой энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: dyadik@rambler.ru

Aleksandr N. Dyadik, Dr. Sci. (Eng.), Professor, the head of department of thermophysical fundamentals of marine power engineering, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190008, Russian Federation, e-mail: dyadik@rambler.ru

Дмитрий Сергеевич Маловик, аспирант кафедры теплофизических основ судовой энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: dimamalovik@gmail.com

Dmitry S. Malovik, graduate student of thermophysical fundamentals of marine power engineering, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190008, Russian Federation, e-mail: dimamalovik@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 09.02.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 21.02.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 22.02.2023.

Научная статья

УДК 621.176.2, 629.036

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.017>

Расчетно-теоретическое исследование двигательно-движительного инжектора на водородно-кислородном топливе

В.В. Кожемякин¹ kogh2012@yandex.ru, Н.Д. Кошкин¹ nik.koshkin99@yandex.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В работе рассматривается вариант использования пароводяного струйного аппарата (ПВСА) в качестве реактивного движителя на подводных аппаратах.

Наиболее целесообразно для этих целей использовать ПВСА, предназначенный для обеспечения циркуляции теплоносителя в первом контуре. Особенностью такого ПВСА является сверхкритическое течение среды в диффузоре.

Рассмотрен вариант, при котором водяной пар для работы такого ПВСА может быть получен путем сжигания водорода в среде кислорода. При этом целесообразно подавать воду в камеру сгорания, чтобы увеличить массовую долю водяного пара в парогазовой смеси.

Проведены расчетно-теоретические исследования зависимости параметров ПВСА от глубины погружения. Исследования проводились для глубин до 1000 метров.

По результатам, выполненных в работе исследований, установлено, что ПВСА с дозвуковым соплом, благодаря сверхкритическому течению двухфазного потока в диффузоре, может быть использован в качестве реактивного движителя на подводном аппарате. Необходимо только так выбрать параметры ПВСА, чтобы скачка конденсации в диффузоре не было.

Ключевые слова: пароводяной струйный аппарат, водородный реактивный движитель, тяга, критическое истечение, паровоздушная смесь.

Для цитирования: Кожемякин В.В., Кошкин Н.Д., Расчетно-теоретическое исследование двигательно-движительного инжектора на водородно-кислородном топливе, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 139—143. DOI:10.37220/MIT.2023.59.1.017

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.017>

Computational and theoretical research of propulsion injector on hydrogen-oxygen fuel

Vyacheslav V. Kozhemyakin¹ kogh2012@yandex.ru, Nikita D. Koshkin¹ nik.koshkin99@yandex.ru

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The work considers the option of using a steam-water jet apparatus (PVSA) as a jet propulsion on underwater vehicles

For these purposes, it is most expedient to use PVSA, designed to ensure the circulation of the coolant in the primary circuit. A feature of such a PVSA is the supercritical flow of the medium in the diffuser.

A variant is considered in which the input steam for the operation of such a PVSA can be obtained by burning hydrogen in an oxygen environment. In this case, it is advisable to supply water to the combustion chamber in order to increase the mass fraction of water vapor in the gas-vapor mixture.

Calculation-theoretical studies of the dependence of the PVSA parameters on the immersion depth have been carried out. The studies were carried out for depths up to 1000 meters.

According to the results of the research work, it was found that a PVSA with a subsonic nozzle, due to the supercritical flow of a two-phase flow in a diffuser, can be used as a jet propulsion device on an underwater vehicle. It is only necessary to choose the PVSA parameters in such a way that there is no condensation jump in the diffuser.

Key words: steam-water jet apparatus, hydrogen jet propulsion, propulsion thrust, critical outflow, vapor-air mixture.

For citation: Vyacheslav V. Kozhemyakin, Nikita D. Koshkin, Computational and theoretical research of propulsion injector on hydrogen-oxygen fuel, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 139—143. DOI:10.37220/MIT.2023.59.1.017

Введение

Как правило, на подводных аппаратах (ПА) используются аккумуляторные батареи. Аккумуляторные батареи имеют значительную массу и небольшой запас энергии. Поэтому появилась тенденция использовать на ПА электрохимические энергоустановки, которые включают в себя электрохимический генератор, а также запасы

водорода и кислорода. В свою очередь, движение ПА обеспечивают электродвигатели.

Поскольку наличие водорода и кислорода позволяет генерировать водяной пар, было предложено использовать на ПА в качестве движителя пароводяной струйный аппарат (ПВСА). Наиболее предпочтительным для этой цели является ПВСА с дозвуковым соплом, созданный в СПбГМТУ для первого контура [1-4]. Такой ПВСА, в отличие от классических ПВСА [5,6], способен

создавать напор при давлениях до 10 МПа. С другой стороны, экспериментальные исследования безбойлерной системы теплоснабжения с ПВСА, проведенные в котельной СПбГМТУ, и инжекторной системы аварийного расхолаживания, проведенные на Приморской учебно-научной базе СПбГМТУ [7,8], показали, что ПВСА с дозвуковым соплом надежно работает и при низких давлениях.

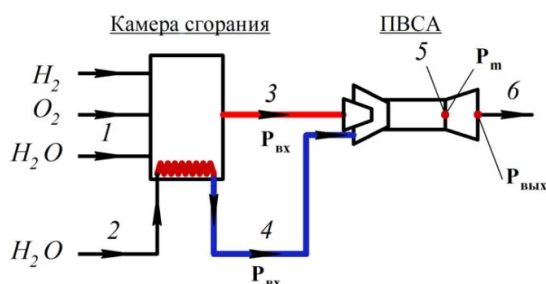
Особенностью такого ПВСА является особая форма проточной части. На выходе из цилиндрического участка проточной части ПВСА устанавливается критическое течение двухфазной смеси. В диффузоре продолжается дальнейший разгон двухфазной смеси, при этом в диффузоре устанавливается сверхкритическое течение. В некотором сечении диффузора происходит скачок конденсации, в котором резко повышается статическое давление. За скачком конденсации в диффузоре происходит торможение воды с соответствующим повышением статического давления.

1. Схема установки

В классическом ПВСА со сверхзвуковым паровым соплом скачок конденсации располагается в цилиндрическом участке проточной части, и в диффузоре поступает однофазная среда – вода [5,6].

Поскольку тяга движителя равна произведению массового расхода на скорость, то, очевидно, ПВСА с дозвуковым соплом, использующийся для циркуляции теплоносителя первого контура, в диффузоре которого движется сверхкритический двухфазный поток, более подходит в качестве движителя. Причем необходимо так выбрать конструктивные и режимные параметры ПВСА, чтобы в диффузоре не было скачка конденсации [9].

На рисунке 1 приведена принципиальная схема установки с ПВСА, использующегося в качестве движителя.



1 – забортная вода в камеру сгорания; 2 – забортная вода в водяное сопло; 3 – пар; 4 – вода после подогрева; 5 – критическое течение пароводяной смеси на выходе из цилиндрического участка; 6 – парожидкостная смесь на выходе из диффузора

Рис. 1. Принципиальная схема установки

При сжигании водорода в кислороде получается высокоперегретый пар. Наиболее предпочтительно подавать в ПВСА сухой насыщенный пар, поэтому в камеру сгорания следует также подавать воду, в количестве достаточном для исключения перегрева пара на входе в ПВСА.

Часть энергии сгорания водорода тратится на подогрев воды, поступающей в водяное сопло ПВСА.

Давление до камеры сгорания и перед соплами принято одинаковым.

2. Проведение исследования

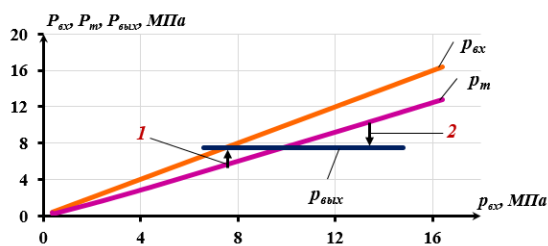
При проведении расчетно-теоретических исследований были приняты следующие исходные данные:

- массовый расход водорода 1 кг/с;
- температура забортной воды 10°C;
- массовое паросодержание на выходе из камеры сгорания 1;
- недогрев воды за ПВСА при условии конденсации пара 20°C.

Также принято, что водород с кислородом подаются в камеру сгорания в стехиометрическом соотношении и полностью взаимодействуют.

Исследования выполнены для глубин 10, 100 и 1000 метров.

Область работы ПВСА как движителя иллюстрирует рисунок 2. Давление на выходе из цилиндрического участка камеры смешения P_m пропорционально давлению на входе $P_{вх}$. Давление на выходе из диффузора $P_{вых}$ должно быть равно давлению на соответствующей глубине (синяя линия).



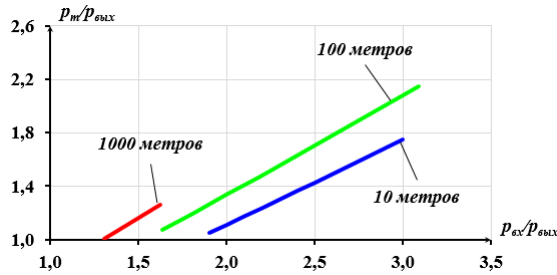
Оранжевая линия – давление на входе в ПВСА; сиреневая линия – критическое давление на выходе из цилиндрического участка; синяя линия – давление на выходе из диффузора; 1 – скачок конденсации и торможение потока с соответствующим повышением статического давления; 2 – дальнейший разгон сверхкритического двухфазного потока

Рис. 2. Соотношение давлений в ПВСА

В точке пересечения сиреневой и синей линий давление на выходе из цилиндрического участка камеры смешения P_m равно забортному давлению. В этом случае диффузор отсутствует, и из цилиндрического участка камеры смешения выходит поток с критической скоростью. Левее точки пересечения необходим диффузор, в котором должен быть скачок конденсации и торможение воды с соответствующим повышением статического давления до уровня забортного давления. В этом случае из диффузора будет выходить вода с небольшой скоростью. Использование ПВСА в этой области в качестве движителя нецелесообразно.

Правее точки пересечения также необходим диффузор, однако в нем двухфазный поток продолжит разгон. В этом случае из диффузора будет выходить двухфазный поток со сверхкритической скоростью. Эта область эффективной работы ПВСА в качестве движителя. Причем, чем больше перепад давления на диффузоре, тем выше скорость истечения двухфазной среды из диффузора и тем выше тяга движителя.

На рисунке 3 представлена зависимость относительного давления на выходе из цилиндрического участка камеры смешения $P_m/P_{вых}$ от относительного давления на входе в ПВСА $P_{вх}/P_{вых}$ для глубин в 10, 100 и 1000 метров.



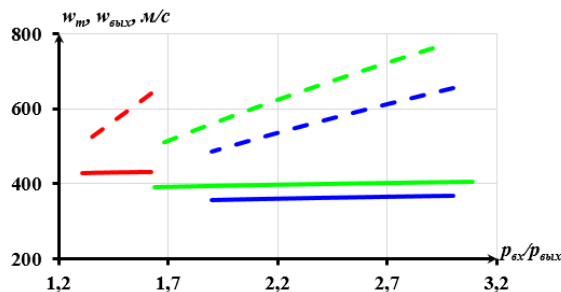
Глубина: синяя линия – 10 м, зеленая линия – 100 м, красная линия – 1000 м.

Рис. 3. Зависимость относительного давления на выходе из цилиндрического участка камеры смешения ПВСА $P_m/P_{вых}$ от относительного давления на входе в ПВСА $P_{вх}/P_{вых}$

Длина линий на рисунке определена границами работоспособности ПВСА, которые существенно зависят от давления и температуры воды.

Необходимо отметить, что при увеличении глубины давление на выходе из цилиндрического участка камеры смешения P_m увеличивается.

В свою очередь, увеличение давления P_m приводит к увеличению скорости на выходе из диффузора. На рисунке 4 представлены зависимости скоростей пара на выходе из цилиндрического участка камеры смешения и на выходе из диффузора от отношения давлений $P_{вх}/P_{вых}$.



Глубина: синяя линия – 10 м, зеленая линия – 100 м, красная линия – 1000 м.

Сплошная линия – скорость на выходе из цилиндрической камеры смешения; пунктирная линия – скорость на выходе из диффузора.

Рис. 4. Зависимость скорости двухфазной смеси на выходе из цилиндрического участка камеры смешения W_m и на выходе из диффузора $W_{вых}$ от отношения давлений $P_{вх}/P_{вых}$

Представленные зависимости показывают, что при увеличении давления на входе в ПВСА, можно достичь существенного увеличения скорости на выходе из диффузора.

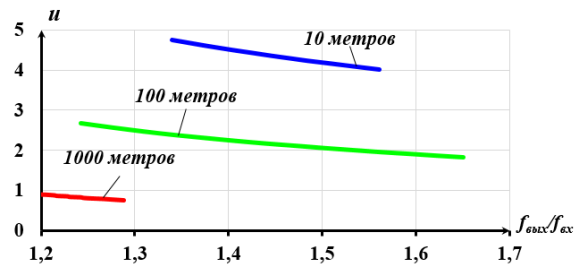
Однако при увеличении глубины увеличиваются давление на входе в ПВСА и, соответственно, температура на выходе из диффузора. Повышение температуры приводит, в свою очередь, к

уменьшению количества нагреваемой забортной воды.

Отношение площади выходного сечения диффузора к площади сечения цилиндрического участка камеры смешения $f_{вых}/f_{вх}$ однозначно связано с отношением давлений $P_{вх}/P_{вых}$.

Причем с увеличением отношения давлений $P_{вх}/P_{вых}$ и глубины увеличивается отношение площадей $f_{вых}/f_{вх}$. Поэтому отношение площадей в равной степени может быть использовано как аргумент на графиках. Различие состоит в том, что отношение площадей дает привязку к конструкции ПВСА.

Это иллюстрирует рисунок 5, на котором представлена зависимость коэффициента инжекции i от относительной площади поперечного сечения на выходе из цилиндрической части ПВСА $f_{вых}/f_{вх}$.



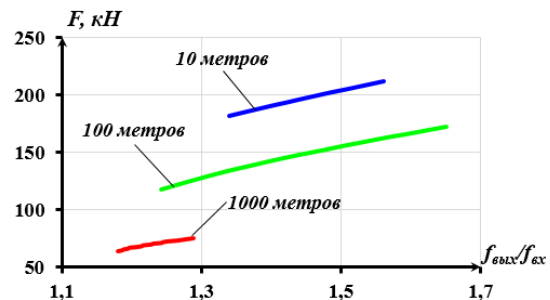
Глубина: синяя линия – 10 м, зеленая линия – 100 м, красная линия – 1000 м.

Рис. 5. Зависимость коэффициента инжекции от отношения площади выходного сечения диффузора к площади сечения цилиндрического участка камеры смешения $f_{вых}/f_{вх}$

Из представленного рисунка следует, что при увеличении отношения площадей $f_{вых}/f_{вх}$ и глубины снижается коэффициент инжекции.

Коэффициент инжекции зависит от массового расхода воды, подаваемой на ПВСА и от пара, поступающего из камеры сгорания. С ростом давления в камере смешения и соответствующим увеличением отношения площадей поперечных сечений выходного диффузора и камеры смешения, воды на инжектор поступает меньше, что ведет к соответствующему уменьшению коэффициента инжекции.

На рисунке 6 представлена зависимость тяги ПВСА для глубин 10, 100 и 1000 метров от отношения площади выходного сечения диффузора к площади сечения цилиндрического участка камеры смешения $f_{вых}/f_{вх}$.



Глубина: синяя линия – 10 м, зеленая линия – 100 м, красная линия – 1000 м.

Рис. 6. Зависимость тяги ПВСА для глубин 10, 100 и 1000 метров от отношения площади выходного сечения диффузора к площади сечения цилиндрического участка камеры смещения $f_{\text{вых}}/f_{\text{вх}}$

Тяга равна произведению суммарного массового расхода воды и пара на скорость на выходе из диффузора. Увеличение отношения площадей увеличивает скорость пароводяной смеси на выходе из диффузора. А при увеличении глубины уменьшается удельный объем пара, что приводит к снижению скорости смеси на выходе из диффузора.

Заключение

Проанализирована работа диффузора ПВСА для случаев, когда статическое давление на выходе из цилиндрического участка проточной части выше и ниже заборного давления.

В случае, когда давление на выходе из цилиндрического участка камеры смещения ниже заборного давления, происходит скачок конденсации и торможение потока с соответствующим повышением статического давления. В противоположном случае происходит разгон сверхкритического двухфазного потока.

Установлено, что на рассматриваемых глубинах, при постоянном расходе топлива, относительное давление в камере смещения ПВСА $P_{\text{тл}}/P_{\text{вых}}$ линейно

зависит от относительного давления в камере сгорания $P_{\text{вх}}/P_{\text{вых}}$. Причем, чем выше заборное давление, тем выше относительное давление в камере смещения ПВСА $P_{\text{тл}}/P_{\text{вых}}$.

Скорость на выходе из диффузора линейно зависит от относительной площади поперечного сечения выходного диффузора, и, с увеличением данного параметра, скорость также линейно возрастает.

Точно таким же образом ведут себя и зависимости тяги ПВСА от относительной площади поперечного сечения выходного диффузора для рассматриваемых глубин и при постоянном расходе топлива.

Таким образом, рассмотрев и проанализировав полученные в ходе работы зависимости параметров от глубины, можно сказать, что ПВСА с дозвуковым соплом, благодаря сверхкритическому течению двухфазного потока в диффузоре, может быть использован в качестве реактивного движителя на подводном аппарате.

Водяной пар для работы такого ПВСА может быть получен путем сжигания водорода в среде кислорода, при этом целесообразно подавать воду в камеру сгорания, чтобы увеличить массовую долю водяного пара в парогазовой смеси.

Литература

1. Рыльцов Н.А., Саловатов Е.Х., Шаманов Н.П. Струйный насос: пат. 2116522 / Заявитель и Патентообладатель СПбГМТУ; заявл. 22.10.1996; опуб. 27.07.1998. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам Российской Федерации, 1996;
2. Шаманов Н.П., Дядик А.Н., Лабинский А.Ю. Двухфазные струйные аппараты. – Л.: Судостроение, 1989.
3. Шаманов Н.П., Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Соломянский В.Б., Алексеенко И.М. Полунатурный стенд для экспериментальных исследований судового ядерного моноблочного паропроизводящего агрегата «Бета» // Морской Вестник. 2011, № 2(38), с. 47-48.
4. Шаманов Н.П., Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Соломянский В.Б., Андреев А.Г., Экспериментальные исследования на полунатурном стенде судового ядерного моноблочного паропроизводящего агрегата «Бета-К» на приморской учебно-научной базе СПбГМТУ // Морской Вестник. 2012, № 2(42), с. 29-31.
5. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. Цегельский В.Г. Струйные аппараты. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.
7. Аполлова А.В., Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Шаманов Н.П. Экспериментальные исследования системы пассивного отвода тепла на Приморской учебно-научной базе СПбГМТУ // Морские интеллектуальные технологии. 2018, № 4 (42) т. 1, с. 115 – 123.
8. Аполлова А.В., Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Тихомиров Б.А., Русаков Е.С. Экспериментальное исследование систем пассивного отвода тепла с ПВСА для реакторных установок // Морские интеллектуальные технологии. 2019, № 4 (46) т. 1, с. 123 – 129.
9. Гоняева С.С., Калмыков А.Н., Кожемякин В.В., Кошкин Н.Д., Маловик Д.С., Морозов Н.А. Использование пароводяного струйного аппарата в качестве движителя на скоростных судах, Морские интеллектуальные технологии. 2022, № 2 (56) т. 2, с. 106 – 110.

References

1. Ryl'tsov N.A., Salovatov E.Kh., Shamanov N.P. Struynny nasos: pat. 2116522 / Zayavitel' i Patentobladatel' SPbGMTU; zayavl. 22.10.1996; opub. 27.07.1998. Federal'naya sluzhba po intellektual'noy sobstvennosti, patentam i tovarnym znakam Rossiyskoy Federatsii, 1996.
2. Shamanov N.P., Dyadik A.N., Labinskiy A.Yu. Dvukhfaznye struynye apparaty. – L.: Sudostroenie, 1989.
3. Shamanov N.P., Kozhemyakin V.V., Shamanov D.N., Solomyanskiy V.B., Alekseenko I.M. Polunaturnyy stend dlya eksperimental'nykh issledovaniy sudovogo yadernogo monoblochnogo paroproizvodyashchego agregata «Beta» // Morskoy Vestnik. 2011, № 2(38), s. 47-48.
4. Shamanov N.P., Kozhemyakin V.V., Shamanov D.N., Solomyanskiy V.B., Andreev A.G., Eksperimental'nye issledovaniya na polunaturnom stende sudovogo yadernogo monoblochnogo paroproizvodyashchego agregata «Beta-K» na primorskoy uchebno-nauchnoy baze SPbGMTU // Morskoy Vestnik. 2012, № 2(42), s. 29-31.
5. Sokolov E.Ya., Zinger N.M. Struynye apparaty. – M.: Energoatomizdat, 1989.
6. Tsegel'skiy V.G. Struynye apparaty. - M.: Izd-vo MG TU im. N.E. Baumana, 2017.

7. Apollova A.V., Kozhemyakin V.V., Shamanov D.N., Shamanov N.P. Eksperimental'nye issledovaniya sistemy passivnogo otvoda tepla na Primorskoj uchebno-nauchnoy baze SPbGMTU // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018, № 4 (42) t. 1, s. 115 – 123.
8. Apollova A.V., Kozhemyakin V.V., Shamanov D.N., Tikhomirov B.A., Rusakov E.S. Eksperimental'noe issledovanie sistem passivnogo otvoda tepla s PVSA dlya reaktornykh ustanovok // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019, № 4 (46) t. 1, s. 123 – 129.
9. Gonyaeva S.S., Kalmykov A.N., Kozhemyakin V.V., Koshkin N.D., Malovik D.S., Morozov N.A. Ispol'zovanie parovodyanogo struynogo apparata v kachestve dvizhitelya na skorostnykh sudakh, Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2022, № 2 (56) t. 2, s. 106 – 110.

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

Вячеслав Вячеславович Кожемякин, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой судовой ядерной и водородной энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kogh2012@yandex.ru

Vyacheslav V. Kozhemyakin, Dr. Sci. (Eng), Associate Professor, the head of department of ship nuclear and hydrogen energetics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kogh2012@yandex.ru

Никита Дмитриевич Кошкин, студент группы 2263, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: nik.koshkin99@yandex.ru

Nikita D. Koshkin, student, group 2263, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: nik.koshkin99@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 26.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 02.12.2022.

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.018>

Исследование жидкостной пленочной нейтрализации газовых выбросов судовых энергетических установок

В.Н. Стаценко¹ vladsta@mail.ru, Л.Б. Леонтьев² leontyev.l.b@yandex.ru, Р.Х. Садыков¹ sadykov_rh@bk.ru

¹Дальневосточный федеральный университет, ²Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

Аннотация. Для снижения концентрации вредных газовых выбросов и аэрозолей судовых дизелей предлагается использование жидкостной нейтрализации. В процессе нейтрализации организовано пленочное течение жидкости по вертикальным пластинам. При движении выхлопных газов или загрязненного воздуха между пластинами пленка жидкости как абсорбент интенсивно поглощает газообразные и твердые загрязняющие вещества. На экспериментальном стенде проведено исследование интенсивности абсорбции в пленку воды углекислого газа. В экспериментах изменялись скорость газа, расход жидкости, концентрация вредных веществ в газе. В результате анализа полученных результатов выявлена оптимальная скорость газа, оптимальное значение орошения. При этом концентрацию двуокиси углерода возможно снизить на 30-45 % на длине контакта 0,6-1 м. Обобщение полученных результатов в широком диапазоне изменения концентраций газа, расходов жидкости и скорости движения загрязненного газа получено в виде зависимости между критериями Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля.

Ключевые слова: газовые выбросы, жидкостная нейтрализация, пленка, вода, абсорбция, экспериментальный стенд, двуокись углерода, концентрация, критерии.

Для цитирования: Стаценко В.Н., Леонтьев Л.Б., Садыков Р.Х. Исследование жидкостной пленочной нейтрализации газовых выбросов судовых энергетических установок. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 144—148. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.018

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.018>

Research of film liquid neutralization of gas emissions from ship power plants

Vladimir N. Statsenko¹ vladsta@mail.ru, Lev B. Leont'ev² leontyev.l.b@yandex.ru,

Ruslan H. Sadykov¹ sadykov_rh@bk.ru

¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation, ² Maritime state university named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. To reduce the concentration of harmful gas emissions and aerosols of marine diesel engines, the use of liquid neutralization is proposed. In the process of neutralization, a film flow of liquid over vertical plates is organized. When exhaust gases or polluted air move between the plates, the liquid film as an absorbent intensively absorbs gaseous and solid pollutants. On the experimental bench, the intensity of carbon dioxide absorption into the water film was studied. In the experiments, the gas velocity, liquid flow rate, and the concentration of harmful substances in the gas were changed. As a result of the analysis of the obtained results, the optimal gas velocity and the optimal irrigation value were revealed. At the same time, the concentration of carbon dioxide can be reduced by 30-45% at a contact length of 0.6-1 m. The generalization of the results obtained in a wide range of changes in gas concentrations, liquid flow rates, and the rate of movement of polluted gas is made in the form of a criterion dependence between the Nusselt, Reynolds and Prandtl criteria.

Key words: gas emissions, liquid neutralization, film, water, absorption, experimental stand, carbon dioxide, concentration reduction, generalization, criteria.

For citation: Vladimir N. Statsenko, Lev B. Leont'ev, Ruslan H. Sadykov Research of film liquid neutralization of gas emissions from ship power plants. Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 144—148. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.018

Введение

Выпускные газы судовых дизелей содержат твердые частицы несгоревшего топлива, а также вредные продукты сгорания. Всего в выпускных газах дизелей обнаружено около 200 компонентов, поэтому суда должны оборудоваться системой их очистки.

Жидкостные пленочные массообменные аппараты широко используются в химической технологии в качестве абсорберов газообразных сред в жидкость, нисходящее движение которой

организуется внутри вертикальных труб или на плоской вертикальной поверхности [1, 4]. Такие аппараты возможно использовать и для очистки уходящих газов, выделяемых, например, при сжигании органического топлива или при проведении различных технологических операций, связанных с выбросами значительного количества токсичных газов и аэрозолей [3, 5].

Для выполнения расчетов процессов абсорбции при различных условиях необходимо знать величины коэффициентов массоотдачи между газом и пленкой жидкости β . При массопередаче между газом и

жидкостью существуют сопротивления газовой и жидкой фаз. Доля каждого из фазовых сопротивлений определяется растворимостью газов. Для хорошо растворимых газов доля сопротивления жидкой фазы невелика, этим сопротивлением пренебрегают. К этим газам можно отнести NH_3 , HCl , SO_2 .

Для плохо растворимых газов (CO_2 , CO , NO) основное сопротивление массопередаче сосредоточено в жидкой фазе. Тогда сопротивлением газовой фазы можно пренебречь.

Для умеренно растворимых газов сопротивления каждой из фаз соизмеримы и пренебрегать ими нельзя.

При массоотдаче между абсорбируемым газом и пленкой большое значение имеет физико-химические свойства жидкости и может происходить процесс хемосорбции [7]. При поглощении, в частности, двуокиси углерода CO_2 раствором карбоната натрия происходит химическая реакция и часть CO_2 переходит в связанное состояние с образованием нерастворимого осадка, и концентрация растворенной окиси углерода понижается, соответственно абсорбционная способность раствора повышается. Скорость химической реакции между CO_2 и раствором карбоната натрия имеет относительно низкие значения, поэтому можно считать, что основное сопротивление массопереносу для оксида углерода сосредоточено в жидкой фазе.

Для описания процессов тепло- и массообмена в пленочных аппаратах обычно используются критериальные уравнения. Каждое из них применимо для определенных условий организации рабочего процесса, конструктивных особенностей аппаратов и т.д. При этом большинство результатов по массообмену обобщается критериальным уравнением вида

$$Nu_D = A Re_r^m Re_{пл}^n Pr_D^p \quad (1)$$

Здесь $Nu_D = \beta l / D$ – критерий Нуссельта, диффузионный; Re_r – критерий Рейнольдса, газовый; $Re_{пл} = \Gamma_V / \nu_B$ – критерий Рейнольдса, пленочный; $Pr_D = \nu / D$ – критерий Прандтля, диффузионный; β – коэффициент массоотдачи, м/с; D – коэффициент диффузии, м²/с; l – определяющий размер, м; $\Gamma_V = G_{пл} / \Pi$ – орошение пластины пленкой жидкости, м²/с; $G_{пл}$ – расход пленки воды, м³/с; Π – смоченный периметр рабочего канала, м; ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Константы A , m , n , p – имеют значительные расхождения, особенно при малых $Re_{пл}$. Это объясняется тем, что исследователи работали в узких диапазонах изменения $Re_{пл}$ и применяли различные условия эксперимента.

Цель настоящей статьи – обобщить в критериальной форме результаты исследования интенсивности снижения концентрации двуокиси углерода в установке жидкостной пленочной нейтрализации. Для реализации этой цели необходимо разработать методики экспериментов и методологию их проведения, на основе полученных экспериментальных результатов разработать методику их критериальной обработки и получить численные значения критериальных зависимостей.

Описание технического решения

В нашей работе для очистки воздуха от газовых выбросов и аэрозолей предлагается использование жидкостного пленочного нейтрализатора [2, 8]. Эта установка представляет собой закрытый корпус с вертикально установленными пластинами, в верхней части которых закреплены пленкообразующие устройства, с их помощью жидкость растекается по обеим сторонам пластин в виде пленки. Загрязненный газ поступает в корпус снизу через входной патрубок и движется вверх между пластинами. Благодаря большой площади контакта пленка жидкости как абсорбент интенсивно поглощает газообразные и твердые загрязняющие вещества и, стекая вниз по пластинам, удаляется из корпуса фильтра. Жидкость после очистки и нейтрализации может подаваться на пленкообразующие устройства для повторного использования. Нейтрализаторы такого типа обладают существенным достоинством – низким гидравлическим сопротивлением и малым брызго- и влагуносом, что является важным фактором для очистки выхлопных газов двигателей.

Для изучения рабочих процессов, происходящих в жидкостном пленочном нейтрализаторе, проведены исследования на экспериментальном стенде, основным элементом которого являлись латунные пластины длиной 1100 и 600 мм [8]. Они жестко закреплены в корпусе с патрубками входа загрязненного и выхода очищенного воздуха. Подача воды на латунную пластину осуществляется через пленкообразующее устройство, пленка воды движется вниз по поверхности рабочей пластины, очищаемый воздух движется вверх, при их контакте происходят процессы абсорбции газов в пленку жидкости и осаждение твердых частиц на поверхности пленки. Для измерения скорости воздуха используется трубка Прандтля с U-образным жидкостным манометром, расход жидкости определяется объемным способом и контролируется по жидкостному манометру.

Основной задачей исследований является определение зависимости изменения концентрации различных газовых и аэрозольных загрязнений по длине рабочей пластины. В настоящей работе в качестве газового загрязнения используется двуокись углерода CO_2 , начальная концентрация задавалась в диапазоне 1,2-4,5 %.

Результаты измерений изменения концентрации двуокиси углерода CO_2 по длине контакта в воде при скорости воздуха $V_{воз} = 1-4$ м/с представлены на рис. 1. В качестве характеристик процесса абсорбции использовались критерии Re_r (газовый) и $Re_{пл}$ (пленочный)

$$Re_r = V_{воз} d_{экв} / \nu_r, \quad (2)$$

$$Re_{пл} = \Gamma_V / \nu_{пл}, \quad (3)$$

где $d_{экв} = \sqrt{4S/\pi}$ – эквивалентный диаметр, м; S – площадь сечения рабочего канала, м².

При исследованиях абсорбции двуокиси углерода в пленку воды получены следующие результаты.

1. Зависимость снижения концентрации газа по длине рабочей пластины имеет экспоненциальный характер. Наиболее значительное изменение концентрации происходит на начальном рабочем участке.

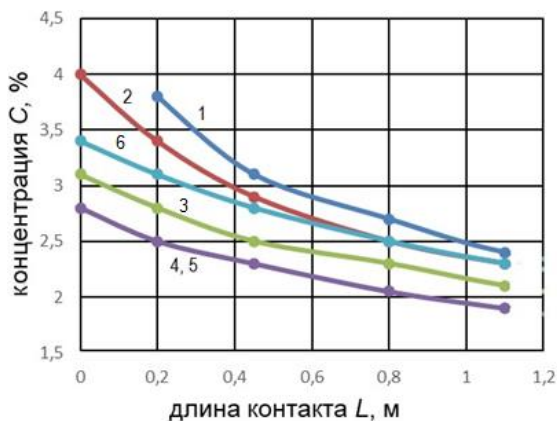


Рис. 1. Изменение концентрации CO₂ по длине контакта; t_r=17°C;

Re_r = 20·10³; 1 – Re_{пл} = 110; 2 – 230;
 Re_e = 31·10³; 3 – Re_{пл} = 76; 4 – 45; 5 – 28;
 t_r = 120°C; 6 – Re_r = 19·10³; Re_{пл} = 76.

2. Интенсивность изменения концентрации газа по длине значительно зависит от начальной его концентрации. Чем выше начальная концентрация, тем значительней ее изменение.

3. При использовании воды в качестве абсорбирующей среды оптимальная скорость воздуха составляет V_{воз}=0,8–1 м/с, оптимальное значение орошения составляет Γ_v = (3,3–3,8)×10⁻⁴ м²/с. При этом концентрация газа CO₂ снижается на 30-45 %.

4. Расход жидкости слабо влияет на интенсивность абсорбции. Так, в диапазоне изменения критерия Re_{пл}=28–76 (кривые 3, 4, 5) изменение концентраций отличается незначительно.

Результаты обобщения

Обобщение результатов исследований абсорбции двуокиси углерода CO₂ в пленку жидкости произведено в системе безразмерных критериев, представленных в (1) с учетом размерных параметров пленочного течения жидкости, предложенного в [6]

$$Nu_D = A Re_r^m Re_{пл}^n Pr_D^p (\delta/L)^k. \quad (4)$$

Здесь Nu_D=g_rδ/(ρ·D·ΔC) - критерий Нуссельта, диффузионный; g_r = G_{аб}/S_{аб} – удельный поток абсорбированного газа, кг/(м²·с); S_{аб}=Γ·ΔL – площадь абсорбции, м²; ΔL – участок канала, м; ΔC – концентрационный напор (движущая сила абсорбции), кг/м³; ρ – плотность среды, кг/м³; δ – толщина пленки, м; L - длина контакта, м; Pr_D=ν_{пл}/D – критерий Прандтля, диффузионный; ν_{пл} – кинематическая вязкость воды, м²/с. Остальные составляющие критериев Re_r и Re_{пл} представлены в уравнениях (1–3). В расчетах критериев Re_r, Re_{пл} и Pr_D использованы экспериментальные и справочные данные.

При расчете критерия Nu_D поток абсорбированного газа G_{аб} (кг/с) на каждом участке рабочего канала ΔL находится по измеренным значениям его концентрации в потоке воздуха перед C_{i-1} и за участком C_i (кг/м³)

$$G_{абm} = G_{воз}(C_{i-1}^f - C_i^f). \quad (5)$$

Здесь G_{воз} – расход воздуха в рабочем канале, м³/с.

Концентрация абсорбированного газа в пленке воды в конце участка C^{пл}_i (кг/кг) и концентрационный напор ΔC (кг/кг) рассчитываются по следующим зависимостям

$$C_i^{пл} = C_{i-1}^{пл} + \frac{G_{абm}}{G_{плm}}, \quad (6)$$

$$\Delta C = C_i^f - C_i^{пл}. \quad (7)$$

Здесь C^{пл}_{i-1} - концентрация абсорбированного газа в пленке перед участком рабочего канала, кг/кг; C^f_i, C^{пл}_i – значения концентраций газа в воздухе и пленке в конце участка, кг/кг; G_{плm} – массовый расход пленки воды, кг/с.

При расчете средних значений коэффициента массоотдачи на участках разной длины контакта концентрационный напор ΔC (кг/кг) рассчитываются по средним значениям концентраций в воздухе и пленке.

При противоточном движении воздуха и пленки воды расчет начальной концентрации абсорбированного газа в воде (кг/кг) производился по массовому балансу по зависимости

$$C_0^{пл} = \frac{G_{воз}(C_0^f - C_L^f)}{G_{плm}}. \quad (8)$$

Здесь C^f₀, C^f_L – концентрация газа в воздухе в начале и конце рабочего канала, кг/м³.

Конечная (по ходу воздуха) концентрация абсорбированного газа в воде C^{пл}_{Lm}=0.

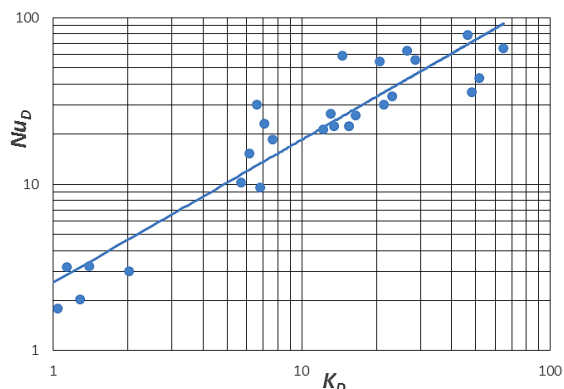


Рис. 2. Обработка экспериментальных данных по локальным значениям абсорбции CO₂ в безразмерных координатах

Результаты обработки наших данных по абсорбции углекислого газа CO₂ в пленке пресной воды для локальных значений на каждом участке рабочего канала получены в широком диапазоне изменения критериев Re_r, Re_{пл} и представлены на рис. 2. Критериальное уравнение, описывающее результаты этих исследований имеет вид

$$Nu_D = 2,6 Re_r^{0,5} Re_{пл}^{0,13} Pr_D^{0,28} (\delta/L)^{0,86} \quad (9)$$

Наши экспериментальные данные обобщаются этим уравнением с погрешностью ±15 %.

Результаты обработки наших данных по абсорбции углекислого газа CO₂ в пленке пресной воды для средних значений массоотдачи на участках рабочего канала разной длины представлены на рис.

3. Критериальное уравнение, описывающее результаты этих данных имеет вид

$$Nu_D = 5,1 Re_l^{0,45} Re_{пл}^{0,11} Pr_D^{0,25} (\delta/L)^{0,76} \quad (10)$$

Наши экспериментальные данные обобщаются этим уравнением с погрешностью $\pm 15\%$.

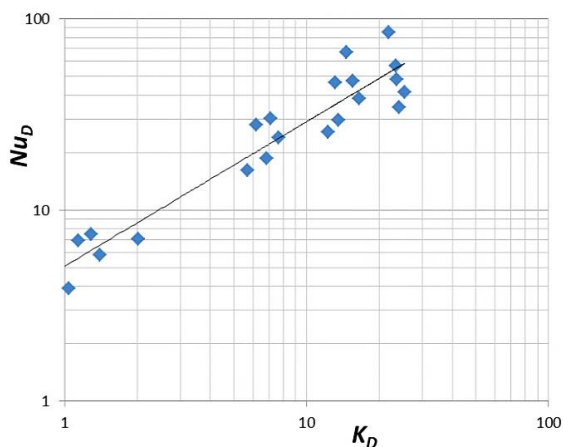


Рис.3. Обработка экспериментальных данных по средним значениям абсорбции CO_2 в безразмерных координатах

Полученные критериальные зависимости по локальным и средним значениям абсорбции углекислого газа в пленку воды позволяет рассчитать значения коэффициентов массоотдачи и абсорбции газа в пленку жидкости по длине контакта и, соответственно, габаритные характеристики жидкостных пленочных массообменных аппаратов в широком диапазоне изменения концентраций газа,

расходов жидкости и скорости движения загрязненного воздуха или газа.

Заключение

В результате анализа процесса абсорбции двуокиси углерода в пленочном жидкостном аппарате можно сделать вывод, что при использовании воды в качестве абсорбирующей среды оптимальная скорость движения газов составляет $V_{\text{воз}} = 0,8-1$ м/с, оптимальное значение орошения составляет $\Gamma_v = (3,3-3,8) \times 10^{-4}$ м²/с, при этом концентрация газа CO_2 снижается на 30–45 %.

Этот метод может использоваться для очистки выхлопных газов судовых дизелей, технологических выбросов, а также выпускных газов от различных энергетических установок, в которых обычно содержатся те же токсичные газообразные компоненты и твердые частицы. Жидкостные нейтрализаторы являются обязательной составляющей систем нейтрализации отработанных газов для специальных подземных установок с дизелями, для дизельных погрузочно-транспортных машин и специального самоходного оборудования, которые работают во взрывоопасной среде (шахтах, рудниках и т.д.). Системы жидкостной нейтрализации применяются также для судовых дизельных установок, где в качестве рабочей жидкости используется забортная вода.

Основной задачей следующих исследований является определение изменения концентрации таких токсичных составляющих выхлопных газов как CO , SO_2 , NO и NO_2 , а также аэрозольных загрязнений от длины контакта при жидкостной пленочной нейтрализации. Результаты этих исследований будут обобщаться в виде критериальных зависимостей.

Литература

1. Абсорбция газовых примесей. URL: <https://msd.com.ua/processy-inzhenernoj-zashhity-okruzhayushhej-sredy/?ysclid=1669mlsz4965855379>.
2. Бернавская М.В., Стаценко В.Н.. Комплексное решение проблемы экологической безопасности автономных гидротехнических сооружений. Дистанционные методы, технические средства и алгоритмы в прикладных задачах исследования природных сред. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск), 2014, № 12, с.3-12.
3. Вострикова М.А. Анализ эффективности работы систем очистки дымовых газов морских судов от примесей при использовании абсорберов и скрубберов. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015, №4, с.66-69.
4. Генералов М.Б., Александров В.П., Алексеев В.В. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств, 2004, 832 с.
5. Гришагин В.М. Сварочный аэрозоль: образование, исследование, локализация, применение: монография. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011, 213 с.
6. Накоряков В.Е., Григорьева Н.И. О совместном тепломассопереносе при пленочной абсорбции// Теплообмен и гидродинамика при кипении и конденсации. - Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1979, с. 278-284.
7. Старкова А.В., Махоткин А.Ф., Балыбердин А.С., Махоткин И.А. Механизм и кинетика хемосорбции углекислого газа водным раствором карбоната натрия. Вестник Казанского технологического университета, 2011, с.76-81.
8. Стаценко В.Н., Еременко М.А., Бернавская М.В. Метод жидкостной пленочной нейтрализации токсичных газовых выбросов. Вестник инженерной школы ДВФУ, 2020, № 2(43), с.88-95. DOI: [dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-9](https://doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-9)

References

1. Absorption of gas impurities. URL: <https://msd.com.ua/processy-inzhenernoj-zashhity-okruzhayushhej-sredy/?ysclid=1669mlsz4965855379>
2. Bernavskaya M.V., Statsenko V.N. A comprehensive solution to the problem of environmental safety of autonomous hydraulic structures. Remote methods, technical means and algorithms in applied problems of studying natural

- environments. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). Individual articles (special issue), 2014, No. 12, s.3-12.
3. Vostrikova M.A. Analysis of the efficiency of the systems for cleaning the flue gases of marine vessels from impurities using absorbers and scrubbers. Bulletin of BSTU imyu V.G. Shukhov, 2015, No. 4, s.66-69.
 4. Generalov M.B., Alexandrov V.P., Alekseev V.V. Machines and apparatus for chemical and petrochemical industries, 2004, 832 s.
 5. Grishagin V.M. Welding aerosol: education, research, localization, application: monograph. Tomsk: Publishing House of the Tomsk Polytechnic University, 2011, 213 s.
 6. Nakoryakov V.E., Grigorieva N.I. On joint heat and mass transfer during film absorption// Heat transfer and hydrodynamics during boiling and condensation. - Novosibirsk: ITF SO AN USSR, 1979. s.278-284.
 7. Starkova A.V., Makhotkin A.F., Balyberdin A.S., Makhotkin I.A. Mechanism and kinetics of chemisorption of carbon dioxide by an aqueous solution of sodium carbonate. Bulletin of the Kazan Technological University. 2011. s.76-81.
 8. Statsenko V.N., Eremenko M.A., Bernavskaya M.V. Method of liquid film neutralization of toxic gas emissions. Bulletin of the FEFU School of Engineering. 2020. No. 2(43), s.88-95. DOI: dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-9

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Николаевич Стаценко, доктор технических наук, профессор, профессор департамента промышленной безопасности, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет, п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток, Россия, 690922, e-mail: vladsta@mail.ru

Лев Борисович Леонтьев, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и организации судоремонта, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток, Россия, 690003, e-mail: leontyev.l.b@yandex.ru

Руслан Ханафьевич Садыков, старший преподаватель департамента промышленной безопасности, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет, п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток, Россия, 690922, e-mail: sadykov_rh@bk.ru

Vladimir N. Statsenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Industrial Safety, Polytechnical Institute, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation, FEFU Campus, 10, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, Russia, 690922, e-mail: vladsta@mail.ru

Lev B. Leontyev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of technology and organization of ship repair, Marine State University, Vladivostok, Russian Federation, 50a, st. Verkhneportovaya, Vladivostok, Russia, 690003, e-mail: leontyev.l.b@yandex.ru

Ruslan H. Sadykov, Senior Lecturer of the Department of Industrial Safety, Polytechnical Institute, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation, FEFU Campus, 10, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, Russia, 690922, e-mail: sadykov_rh@bk.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.12.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 13.01.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 14.01.2023.

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

Научная статья

УДК 621.371

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.019>

Оптимизации гидроакустических информационных систем подводных аппаратов для повышения эффективности подводного поиска

В.Л. Мартынов¹ martynovvoenmeh@mail.ru, Н.М. Божук¹ kaf_rmf@gumrf.ru, Г.В. Ильин¹ kaf_rmf@gumrf.ru,
Э.В. Кречетова¹ emi.krechet@icloud.com, М.С. Шиманская^{1,2} shimanskii@inbox.ru,
Г.С. Шиманская² galya.shimanskaya@list.ru

¹Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова,

²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация. Эффективность мероприятий, связанных с проведением подводного поиска робототехническими комплексами, базируются на оптимизации гидроакустических систем и реализуемых алгоритмах поиска. В свою очередь, такие алгоритмы, представляющие совокупность определенных действий, находятся в прямой зависимости от технической оснащённости подводной робототехники. В статье изложены особенности проведения поисковых мероприятий и соответствующие ему алгоритмы в зависимости от технической оснащённости подводных аппаратов. Проведён анализ применения систем технического зрения при проведении подводного поиска, а также анализ эффективности поисковых мероприятий гидроакустическими системами подводных аппаратов. Рассмотрены вопросы их оптимизации на базе формирования узконаправленной характеристики направленности, изложены пути реализации этого. Исследованы последствия влияния помехи обратного рассеяния на эффективность систем подводного видения. Предложен способ определения трех пространственных координат объекта наблюдения, что может быть использовано для точного ориентирования на него телевизионных средств подводного видения для идентификации объекта наблюдения. Актуальность рассмотренных в статье вопросов оптимизации гидроакустических информационных систем не вызывает сомнений, так как их внедрение обеспечит повышение эффективности проведения подводного поиска по сравнению с существующими образцами подводной робототехники.

Ключевые слова: эффективность, аппарат, система, гидроакустика, поиск, контраст, коэффициент, помеха.

Для цитирования: Мартынов В.Л., Божук Н.М., Ильин Г.В., Кречетова Э.В., Шиманская М.С., Шиманская Г.С. Оптимизации гидроакустических информационных систем подводных аппаратов для повышения эффективности подводного поиска, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 149—157. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.019

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.019>

Optimization of hydroacoustic information systems of underwater vehicles to improve the efficiency of underwater search

Victor L. Martynov¹ martynovvoenmeh@mail.ru, Nikolay M. Bozhuk¹ kaf_rmf@gumrf.ru,
Gennady V. Ilyin¹ kaf_rmf@gumrf.ru, Emilia V. Krechetova¹ emi.krechet@icloud.com,
Marianna S. Shimanskaya^{1,2} shimanskii@inbox.ru, Galina S. Shimanskaya² galya.shimanskaya@list.ru

¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,

²Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Abstract. The efficiency of activities related to the conduct of underwater search by robotic complexes is based on the optimization of hydroacoustic systems and search algorithms implemented. In turn, such algorithms, representing a set of certain actions, are directly dependent on the technical equipment of the underwater robotics. The article describes the peculiarities of the search activities and the corresponding algorithms, depending on the technical equipment of underwater vehicles. The analysis of the use of vision systems during underwater search, as well as the analysis of the effectiveness of search activities by hydroacoustic systems of underwater vehicles is carried out. The problems of their optimization on the basis of formation of narrow directional characteristic were considered, the ways of its realization were stated. The consequences of the influence of backscattering interference on the effectiveness of underwater vision systems are studied. A method for determining three spatial coordinates of an object of observation which can be used for precise orientation of underwater television means for identifying an object of observation is offered. Relevance of the issues of optimization of hydroacoustic information systems considered in the article does not cause doubts, as their introduction will provide increased efficiency of underwater search in comparison with the existing samples of underwater robotics.

Keywords: efficiency, apparatus, system, sonar, search, contrast, coefficient, hindrance.

For citation: Victor L. Martynov, Nikolay M. Bozhuk, Gennady V. Ilyin, Emilia V. Krechetova, Marianna S. Shimanskaya, Galina S. Shimanskaya Optimization of hydroacoustic information systems of underwater vehicles to

improve the efficiency of underwater search, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 149—157. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.019

Введение

Бурное развитие робототехнических комплексов ставит перед государством задачи по противодействию существующим потенциальным угрозам – морскому терроризму. Решение этих задач на морских акваториях усложняется тем, что малый эквивалентный радиус подводных роботов затрудняет их обнаружение существующими гидроакустическими системами. Особенность подводных роботов в виде низкой шумности и растущий технологический прогресс по производству подводных робототехнических комплексов странами, имеющими общую акваторию с Российской Федерацией, может нанести урон нашему государству путём разрушения объектов инфраструктуры, так и путём добывания важной разведывательной информации. Следует отметить, что мероприятия, связанные с эффективностью проведения подводного поиска, будут для подводной робототехники актуальными всегда. Её уникальность заключается в том, что кроме перечисленных вопросов защиты и безопасности российского государства именно с помощью подводных аппаратов решается вопрос успешного освоения ресурсов Мирового океана в совокупности с выполнением специальных задач. При этом оптимизация гидроакустических систем робототехнических комплексов обеспечит выбор оптимальных алгоритмов поисковых мероприятий, что уменьшит их зависимость от бортовых систем технического зрения.

Основные проблемы систем технического зрения автономных обитаемых подводных аппаратов

Качество получаемой видеоинформации системами технического зрения автономных обитаемых подводных аппаратов (далее - АНПА) и иных носителей, зависит от ряда факторов, влияющих как на работу подводных телекамер, так и на распространение светового потока, формируемого бортовыми источниками подсветки. От этих факторов зависит и главный тактический параметр указанных систем - дальность видения объекта. Для повышения эффективности функционирования систем подводных телекоммуникаций следует представлять физические процессы в гидросфере, сопровождающие получение видеоинформации, и учитывать их при эксплуатации систем подводного видения. Рассмотрим эти процессы подробнее.

Дальность видимости объекта в любой рассеивающей среде, и особенно в воде, зависит от расстояния. Максимальная дальность, которую могут на сегодняшний день обеспечить камерные установки на подводных аппаратах для черно-белого канала, составляет $0,7 \cdot z_0$, где z_0 – дальность видимости стандартного белого диска диаметром 300 мм (диска Секки) под водой. В зависимости от показателя ослабления водной среды ϵ дальность видимости по черно-белому каналу, как показывает опыт эксплуатации средств подводного телевидения, колеблется от 5 до 18...20 метров. Необходимо

установить причины, влияющие на дальность действия системы подводного видения. От того, насколько эффективно можно их уменьшить, зависит возможность реализации интегральной системы оценки подводной обстановки на АНПА. Для этого проанализируем, от чего зависит дальность видимости под водой средствами телевидения.

Если АНПА постепенно удаляется от какого-либо предмета, то его видимость будет монотонно снижаться. Причина этого снижения видимости заключается в двух явлениях.

Во-первых, с удалением от наблюдаемого объекта снижается его угловой размер и, следовательно, повышается пороговый контраст зрения $K_{\text{порог}}$, стоящий в знаменателе выражения (1):

$$K = \frac{K}{K_{\text{порог}}}, \quad (1)$$

где V – видность, K – истинный контраст объекта, $K_{\text{порог}}$ – пороговый контраст телевизионной камеры.

Пороговый контраст $K_{\text{порог}}$ характеризует контрастную чувствительность зрения. Многочисленные исследования различных авторов показывают, что величина порогового контраста при фиксированном наблюдении в первом приближении одинакова у всех людей и имеет порядок 0,15...0,25 для объектов с угловыми размерами, равными или большими 10 [1]. Учитывая сказанное, на пороговый контраст зрения оператора повлиять невозможно.

Во-вторых, рассеяние светового излучения, идущего от наблюдаемого объекта, а также излучения, пришедшего со стороны, вызывает образование так называемой вуалирующей дымки, которая в литературе по гидрооптике получила название помехи обратного рассеяния (ПОР). ПОР значительно ухудшает условия наблюдения под водой, что особенно хорошо видно на рисунке 1:



Рис. 1. Помеха обратного рассеивания при подводном наблюдении объектов

Камерная установка и светильники АНПА находятся рядом и не разнесены в пространстве.

Такая картина, к счастью, является редкой и представляет собой следствие неправильного расположения светильников и телевизионных камер. В образовании «световой дымки», снижающей контраст изображения, участвует весь объем воды, освещенной источником света в пределах конуса зрения. Поэтому уменьшение влияния обратного рассеяния может быть получено прежде всего в результате уменьшения освещенного конуса зрения

в объеме воды, полученное пространственным разнесением телевизионного приемника и светового излучателя – рисунок 2:

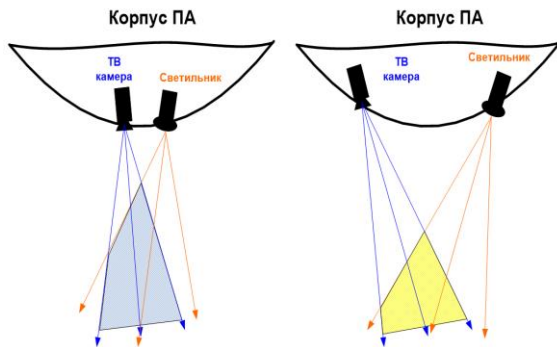


Рис. 2. Уменьшение ПОР за счет разнесения ТВ камеры и светильника

Возможности по разнесению телевизионной камеры и светильников на АНПА ограничены размерами его корпуса, хотя это учитывается при проектировании. Более существенным является уменьшение угла поля зрения телевизионной камеры - рисунок 3:

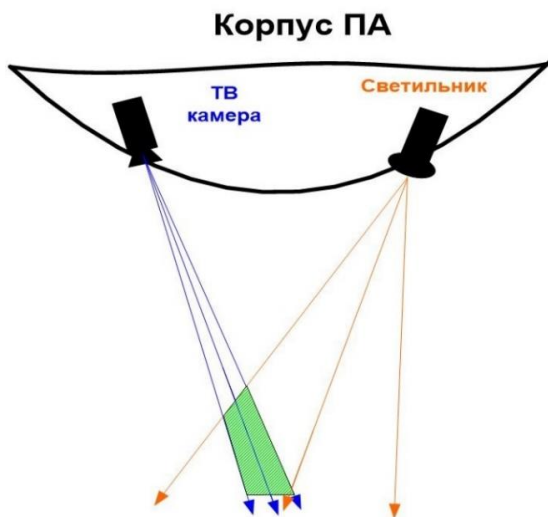


Рис. 3. Снижение ПОР за счет уменьшения угла поля зрения

Как видно, объем освещенной воды в конусе зрения телевизионной камеры является минимальным. Следовательно, величина ПОР, отраженной в сторону телевизионного объектива, уменьшится, что повысит отношение δ (сигнал/помеха).

В литературе по гидрооптике не найдено математического описания зависимости δ от угла поля зрения телевизионного приемника θ^0 . В основном величину δ характеризуют различные шумы либо передаточные функции. Например, в [2] приведена формула, согласно которой:

$$\delta = \frac{\Delta\langle i \rangle}{\sqrt{\langle i_{ш}^2 \rangle + \langle i_{ш.внутр.}^2 \rangle}}, \quad (2)$$

где:

$$\Delta\langle i \rangle = \eta_{\phi} \cdot \langle \Delta P_{об.} \rangle = 2 \cdot \eta_{\phi} \cdot K \cdot \langle P \rangle, \quad (3)$$

где $\langle \rangle$ – операция статистического усреднения, δ – отношение «сигнал/шум», $\Delta\langle i \rangle$ – разность значений фототока $\langle i \rangle$, соответствующих элементам объекта с максимальным (R_{max}) и минимальным (R_{min}) значениями коэффициента отражения, $\langle i_{ш}^2 \rangle$ – дисперсия внешних шумов, $\langle i_{ш.внутр.}^2 \rangle$ – дисперсия внутренних шумов, $\langle \eta_{\phi} \rangle$ – чувствительность фотокатода детектора, $\langle P \rangle$ – статистически среднее значение полной мощности P на элементе изображения объекта с однородным коэффициентом отражения $R = R_{об.}$, $\langle \Delta P_{об.} \rangle$ – статистически среднее значение мощности на элементе изображения от объекта, прошедшего диафрагму, K – контраст изображения.

В [3] значение воспринимаемого оператором отношения «сигнал/шум», пересчитанное к выходу фотоприемного устройства, определяется выражением:

$$\delta = \frac{\Delta n_c \cdot T_{сист.} \cdot T_{гл.} \cdot T_{мон.}}{(n_{сист.}^2)^{\frac{1}{2}} \cdot M(v_x, v_y) \cdot N(f)}, \quad (4)$$

где:

$$\Delta n_c = \bar{n}_{об.} - \bar{n}_{\phi}, \quad (5)$$

где Δn_c – разность средних значений фотоэлектронов, формируемых соседними элементарными ячейками (пикселями) фотоприемного устройства под воздействием сигнального и фонового излучения за определенный временной интервал, $T_{сист.}$ – модуляционная передаточная функция (МПФ) телевизионной системы на выходе электронного тракта, $T_{гл.}$ – МПФ зрительного анализатора (глаза), $T_{мон.}$ – МПФ дисплея (монитора), $(n_{сист.}^2)^{\frac{1}{2}}$ – среднеквадратическое значение числа шумовых фотоэлектронов, приведенное к одной ячейке, $M(v_x, v_y) \cdot N(f)$ – функции, описывающие пространственную и временную интегрирующую способность зрительного анализатора.

Величина $(n_{сист.}^2)^{\frac{1}{2}}$ в формуле (4) характеризует суммарный шум системы подводного видения, приведенный к накопительной ячейке ПЗС матрицы.

$(n_{сист.}^2)^{\frac{1}{2}}$ можно выразить в виде:

$$(n_{сист.}^2)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\langle n_1^2 \rangle + \langle n_2^2 \rangle + \langle n_3^2 \rangle + \dots + \langle n_n^2 \rangle}, \quad (6)$$

где $(n_{сист.}^2)^{\frac{1}{2}}$ – дисперсия i -го шумового компонента, $\langle n_i^2 \rangle^{\frac{1}{2}}$ объединяет в себе такие виды шумов фотоприемного устройства и электронного тракта, как:

- дробовый шум входного излучения;
- фиксированный шум подложки;
- шум внутреннего усилителя;
- шум внешних усилителей;
- шум квантования.

Эти шумы, влияющие на величину δ (отношение «сигнал/помеха»), имеют отношение только к технике, но не учитывают водную среду, как источник образования ПОР.

В [4] приводится выражение для δ с учетом помехи обратного рассеяния:

$$\delta = \frac{P_{ис} + P_{пор}}{P_o} = \eta_{ис} + \eta_{пор}, \quad (7)$$

где $P_{ПС}$ – мощность полезного сигнала, $P_{ПОР}$ – мощность помехи обратного рассеяния, $\eta_{ПС}$ – коэффициент передачи полезного сигнала, P_0 – полная мощность светового сигнала на входе телевизионной системы, $\eta_{ПОР}$ – коэффициент передачи ПОР, однако не определено, как ее можно минимизировать.

Именно задачу снижения ПОР необходимо исследовать более углубленно, чтобы найти пути повышения дальности видимости систем подводного видения. Для этого в первую очередь следует составить математическую модель зависимости ПОР от технических характеристик систем видения. Эта зависимость должна содержать угол поля зрения телевизионной системы.

О важности поставленной задачи можно судить не только с точки зрения формирования интегрированной системы оценки подводной обстановки (ИСОПО), но и с точки зрения практической эксплуатации систем подводного видения на АНПА. На рисунке 4 показано фото, полученное при обследовании подводным аппаратом затонувшей ПЛ «Комсомолец». Телевизионная камера находится примерно в 4...5 метрах от боевой рубки ПЛ. Светильники АНПА освещают левый борт ПЛ «Комсомолец». Из рисунка 4 [4] следует, что вуалирующая дымка влияет на дальность видимости под водой: за пределами рубки практически ничего не видно.



Рис. 4. Вуалирующая дымка не позволяет рассмотреть зону за рубкой подводной лодки

Белые точки в левой части кадра представляют из себя планктон, отражающий свет прожекторов и создающий помеху обратного рассеяния. Так как водная среда всегда содержит оптические неоднородности, отражающие свет, то при использовании подводных светильников эффект рассеяния света вызовет на расстоянии D образование вуалирующей дымки яркостью L_d . Яркость этой вуалирующей дымки в литературе по гидрооптике иногда обозначают $L_{ПОР}$. Она приводит к уменьшению видимого контраста – контраста изображения, то есть контраста, наблюдаемого на расстоянии D от объекта.

Это можно доказать математически. Контраст изображения $K_{из}$ выражает диапазон яркостей в изображении (на экране) и численно равен:

$$K_{из} = \frac{L_{max}}{L_{min}}, \quad (8)$$

Где $K_{из}$ – контраст изображения при отсутствии ПОР, L_{max} , L_{min} – экстремальные значения яркости.

Таким образом, выражение (8) есть отношение максимальной яркости в поле зрения к минимальной.

Контраст изображения определяется не только характеристиками телевизионной системы, но и внешними условиями: $L_{ПОР}$ – помехой обратного рассеяния, ε – показателем ослабления водной среды.

Контраст изображения при наличии дополнительной (внешней) засветки $L_{ПОР}$ может быть определен из выражения:

$$K' = \frac{L_{max} + L_{ПОР}}{L_{min} + L_{ПОР}} = \frac{\frac{L_{max}}{L_{min}} (L_{max} + L_{ПОР})}{L_{min} (L_{min} + L_{ПОР})} = \frac{L_{max} (1 + \frac{L_{ПОР}}{L_{max}})}{L_{min} (1 + \frac{L_{ПОР}}{L_{min}})} = \frac{L_{max}}{L_{min}} \cdot \frac{1 + \frac{L_{ПОР}}{L_{max}}}{1 + \frac{L_{ПОР}}{L_{min}}}, \quad (9)$$

где K' – контраст в изображении при дополнительной внешней засветке $L_{ПОР}$.

Так как $L_{max} \gg L_{min}$, то:

$$\frac{L_{ПОР}}{L_{max}} \ll \frac{L_{ПОР}}{L_{min}}, \quad (10)$$

откуда следует, что:

$$\frac{1 + \frac{L_{ПОР}}{L_{max}}}{1 + \frac{L_{ПОР}}{L_{min}}} < 1 \quad (11)$$

Следовательно, $K' < K_{из}$, то есть наличие ПОР снижает контраст изображения. Это хорошо видно на рисунке 5:



Рис. 5. Помеха обратного рассеяния снижает контраст изображения

Фото на рис. 5 подтверждает выводы, сделанные при рассмотрении рисунка 4 о том, что ПОР, ухудшая условия видимости, влияет на дальность телевизионных систем. Это следует из того, что снижение контраста изображения неизбежно повлечет за собой уменьшение глубины модуляции в изображении, что видно на рисунке 6:

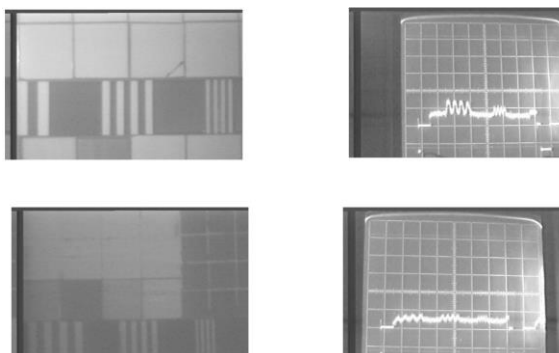


Рис. 6. Изменение модуляции объекта, вызванное изменением его контраста

Показатель ослабления воды в бассейне на верхнем фото рис. 6 составляет $\varepsilon = 0,2 \text{ м}^{-1}$. Замер производился измерителем прозрачности ИП-1, разработанным в ЦНИИ РАН им. Шершова. После введения в воду бассейна примесей (раствор йода) показатель ослабления составил $\varepsilon = 0,4 \text{ м}^{-1}$ - ниже фото рисунка 6.

За счет увеличения состава примесей в воде возросло рассеяние светового потока на оптических неоднородностях, что привело к перераспределению максимальной и минимальной яркостей на тест-объекте (штрихи миры):

$$M = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max}} = \frac{L_{об.} - L_{ф.}}{L_{об.}}, \quad (12)$$

где M – модуляция видеосигнала на осциллограмме.

Так как приемное устройство регистрирует разность энергий оптического диапазона, отраженных объектом и фоном, то перераспределение яркостей между объектом и фоном (то есть уменьшение L_{max} и увеличение L_{min}) привело к уменьшению глубины модуляции видеосигнала.

Сказанное подтверждается и математически. Модуляция видеосигнала и контраст изображения связаны пропорциональной зависимостью [3]:

$$\frac{K_{из.}}{K_{об.}} = \frac{m'}{m}, \quad (13)$$

где $K_{из.}$ – контраст изображения, $K_{об.}$ – контраст объекта, m' – глубина модуляции в изображении, m – глубина модуляции объекта.

Таким образом, из формулы (13) видно, что между контрастом изображения и глубиной модуляции в изображении пропорциональная зависимость. На основании сказанного можно сделать вывод, что помеха обратного рассеяния снижает контраст изображения, что вызывает уменьшение глубины модуляции объекта в изображении на экране. В свою очередь уменьшение глубины модуляции является следствием уменьшения дальности действия подводной системы видения, так как чтобы восстановить модуляцию изображения объекта, необходимо к нему приблизиться, управляя ходом АНПА.

Актуальность оптимизации поисковых средств АНПА

Анализируя физические основы поиска [3...7], включающие рассмотрение среды его проведения, объектов, а также средств обнаружения, можно отметить, что результат проведения поисковых операций одних и тех же объектов в одних и тех же водных акваториях для различных АНПА будет зависеть от того, какими средствами обнаружения те оснащены. Наличие определенного состава технических средств и их оптимизация будет диктовать выработку эффективной последовательности действий, составляющих алгоритм поиска, что является актуальным в условиях определенных ограничений АНПА, перечисленных выше.

Создание таких алгоритмов применительно к задаче повышения поискового потенциала подводной робототехники даст возможность определить направление научного исследования,

обеспечивающего формирование на АНПА оптимальной системы подводного поиска.

Существующий в настоящее время алгоритм поиска подводных объектов научно-исследовательскими подводными аппаратами не является оптимальным. Расположенная в носовой части АНПА телевизионная камера (ТВК) обеспечивает визуальный просмотр небольшой части пространства впереди по курсу. Сложность в использовании систем технического зрения АНПА заключается в том, что на параллельных галсах зоны визуального просмотра должны пересекаться, чтобы не допустить пропуска объектов поиска. При этом, ориентированные по бортам гидролокаторы бокового обзора (ГБО) не позволяют достоверно классифицировать акустический контакт с обнаруженными объектами.

Существующий состав поисковых технических средств дает возможность применить такой алгоритм, который априори не может быть эффективным. Причина - возможный пропуск объектов поиска. Это следует из того, что объект, находящийся на траверзах (по бортам) АНПА, необходимо обнаружить гидролокатором бокового обзора и классифицировать.

В гидроакустике измерение дальности осуществляется локацией (излучением) зондирующих импульсов гидролокатором бокового обзора по бортам судна. Импульсы в виде звуковой (низкочастотной) энергии, дискретной по времени, излучаются акустической линейной антенной решеткой, отражаются от объекта и отраженным эхосигналом воспринимается этой же антенной.

Измерение азимута (А) объекта в известном способе осуществляется выбором направления излучения зондирующих импульсов по горизонту вертикально ориентированной диаграммой направленности, то есть реализацией электронного сканирования - рисунок 7 [6]:

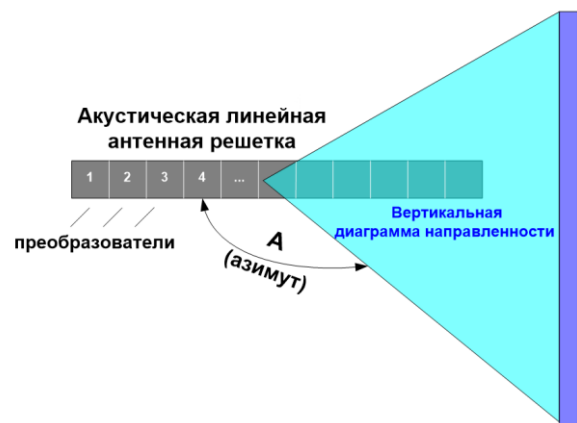


Рис. 7. Измерение азимута объекта гидролокатором бокового обзора

Это обеспечивается введением временной задержки момента начала излучения акустической энергии каждым последующим преобразователем стационарной акустической линейной антенной решетке относительно первого преобразователя.

Процесс совместного измерения дальности D и азимута A объекта гидролокатором бокового обзора представлен на рисунке 8 [7]:

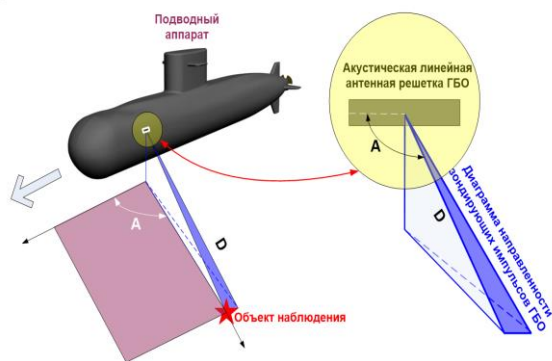


Рис. 8. Измерение дальности D и азимута A

Недостатком известного способа является потеря информативности. Объекты, обнаруженные ГБО в пространстве (во взвешенном состоянии), определяются как объекты, расположенные на грунте.

Известен способ измерения трех координат объекта. Он основан на излучении зондирующего импульса акустической антенной в широком секторе по азимуту и углу места, с последующим приемом эхо-сигналов веером статических диаграмм направленности. Каждая диаграмма направленности статического веера осуществляет прием эхо-сигнала по заданному ей направлению без сканирования в пространстве.

Недостатками указанного известного способа измерения трех координат объекта являются:

- низкая точность, связанная с возможностью пропуска объекта поиска из-за дискретности зоны просмотра;
- малая дальность действия, вызванная низкой плотностью мощности эхо-сигнала;
- сложность реализации алгоритмов обработки эхо-сигналов.

Техническим результатом предлагаемого способа измерения координат объекта гидролокатором бокового обзора является точное определение трех его координат, что дает возможность достоверно позиционировать объект в пространстве.

Это достигается тем, что способ измерения трех пространственных координат объекта в водной среде гидролокатором бокового обзора основан на взаимодействии двух взаимно пересекающихся диаграмм направленности (ДН). Их пересечение обеспечивает перемножение эхо-сигналов, получаемых каждой диаграммой направленности, в результате чего образуется так называемая «игольчатая» ДН.

Каждая из двух взаимодействующих диаграмм направленности образована своей акустической линейной антенной решеткой, при этом указанные антенные решетки располагаются ортогонально друг относительно друга.

Способ измерения координат объекта гидролокатором бокового обзора отличается от известного тем, что по предлагаемому способу объект наблюдения просматривается каждой из двух сканирующих диаграмм направленности и находится в зоне действия «игольчатой» ДН, осуществляющей его позиционирование в пространстве с определением трех пространственных координат:

- дальности;

- курсового угла (азимута);
- угла места.

Представленный чертеж поясняет суть предлагаемого технического решения. На рисунке 9 [8] изображена физическая модель акустической антенны, с помощью которой реализуется предлагаемый способ измерения координат объекта гидролокатором бокового обзора:

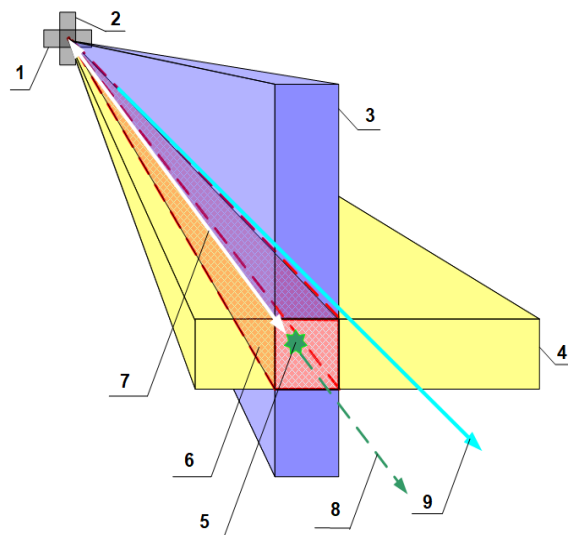


Рис. 9. Физическая модель акустической системы для измерения координат объекта гидролокатором бокового обзора

Акустическая антенна содержит две смещенные акустические линейные антенные решетки 1 и 2. Обе антенные решетки расположены друг относительно друга под углом 90° , образуют жесткую конструкцию и формируют две отдельные ортогонально расположенные плоские диаграммы направленности: вертикальную 3 и горизонтальную 4. Вертикально расположенная диаграмма направленности 3 образована горизонтальной акустической линейной антенной решеткой 1 и сканирует в горизонтальной плоскости, а горизонтально расположенная диаграмма направленности 4 образована вертикальной акустической линейной антенной решеткой 2 и сканирует в вертикальной плоскости.

Перед сканированием диаграмм направленности в пространстве происходит облучение акустической энергией объекта наблюдения 5.

Предлагаемый способ реализуется следующим образом.

Сначала в водную среду излучается зондирующий импульс, после чего акустической антенной принимаются отраженные от объектов эхо-сигналы.

Излучение акустической энергии в пространство выполняет горизонтальная линейная акустическая антенная решетка 1, диаграмма направленности 3 которой сканирует из крайнего левого положения в крайнее правое.

После этого осуществляется прием отраженных эхо-сигналов. Для этого две плоские диаграммы направленности 3 и 4 сканируют в водной среде последовательно, друг за другом.

Сначала прием эхо-сигналов производится диаграммой направленности (ДН) 4, сканирующей из крайнего верхнего положения в крайнее нижнее.



Рис. 10. Физическая модель акустической системы для измерения координат объекта гидролокатором бокового обзора

После этого ДН 4 стоит, а ДН 3 сканирует из крайнего правого положения в крайнее левое. Далее ДН 3 стоит, а ДН 4 сканирует из крайнего нижнего положения в крайнее верхнее и так далее - рисунок 10 [9].

Время излучения, время сканирования и время, в течение которого ДН стоит, всегда одинаково. Взаимное пересечение горизонтальной 4 и вертикальной 3 диаграмм направленности обеспечивает формирование «игольчатой» диаграммы направленности 6, обеспечивающей определение дальности 7 до объекта наблюдения. Лучи, представляющие собой направление на объект наблюдения 8 и направление геометрической оси 9 двух антенных решеток, обеспечивают позиционирование объекта как по азимуту, так и углу места.

Предлагаемый способ обеспечивает определение трех пространственных координат объекта наблюдения и может быть использовано для точного ориентирования на него телевизионных средств подводного видения при проведении подводного поиска [10].

Заключение

Таким образом, оптимизация гидроакустических систем автономных необитаемых подводных аппаратов, реализованная в гидролокаторах

бокового обзора на базе предлагаемого способа определения пространственных координат объектов поиска, обеспечит повышение эффективности его проведения. Предлагаемая оптимизация систем гидроакустики АНПА позволяет повысить эффективность проведения подводного поиска, улучшая его результаты с учётом меньшей зависимости от систем технического зрения. Кроме того, указанная эффективность линейно связана с увеличением рабочего времени подводных аппаратов за счёт его экономии на классификацию обнаруженных подводных объектов, которая осуществляется системами технического зрения по их точным координатам. Рассмотренные в статье особенности применения телевизионных систем АНПА с учётом их зависимости от помехи обратного рассеяния подтверждают актуальность результатов исследования оптимизации гидроакустических информационных систем подводных аппаратов, так как, во-первых, снижают зависимость отечественной промышленности от зарубежных технологий, а во-вторых, развивают такое важное направление, как импортозамещение. Математический аппарат, предложенный для расчёта контраста, обосновывает утверждение о том, что между контрастом изображения и глубиной модуляции в изображении пропорциональная зависимость. Это означает, что помеха обратного рассеяния снижает контраст изображения, что вызывает уменьшение глубины модуляции объекта в изображении на экране. В свою очередь уменьшение глубины модуляции является следствием уменьшения дальности действия подводной системы видения. Это обосновывает актуальность проведения модернизации гидроакустического вооружения подводных аппаратов.

Предложенные пути модернизации, обеспечивающие формирование точечной диаграммы направленности, направлены на определение трёх пространственных координат объектов поиска, что может быть использовано как элемент системы управления бортовым телевизионным оборудованием.

С учётом сказанного, результаты исследования, изложенные авторами, являются актуальными в вопросах оптимизации гидроакустических информационных систем в частности, и отечественной подводной робототехники в целом.

Литература

1. А. Н. Дмитриев. Проектирование подводных аппаратов, Ленинград, изд. «Судостроение», 1978, 240 с.
2. Протокол заседания НТС ВПК РФ № 10 (91) от 04.04.2017 г. на тему: «Научно-технические проблемы создания автономных источников электропитания длительного срока службы».
3. В.А.Абчук, В.Г.Суздаль. Поиск объектов, Москва, изд. «Советское радио», 1977, 334 с.
4. Л.А.Емельянов и др. Теория поиска в военном деле, Москва, изд. «Воениздат», 1964, 208 с.
5. Р.Ф.Жуков, А.А.Кондратович и др. Системы, приборы и устройства подводного поиска, Москва, изд. «Воениздат», 1972, 184 с.
6. В.А.Абчук, Ф.А.Матвейчук, и др. Введение в теорию выработки решений, Москва, изд. «Воениздат», 1972, 344 с.
7. В.И.Дикарев и др. Методы и средства обнаружения объектов в укрывающихся средах, Санкт-Петербург, изд. «Наука и техника», 2004, 280 с.

8. В. Л. Мартынов, М. В. Дмитриев, В. Н. Прохоров. Основы расчёта телевизионных систем подводного видения. Труды Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА - 2020), Санкт-Петербург, изд. «Политех-пресс», 2020, с. 262-266.
9. Мартынов В.Л., Голосной А.С., Сергеев С.М. Беспроводной оптический канал связи в гидросфере как альтернатива связи по кабелю // Системы управления и информационные технологии. №1 (83). 2021. С. 63-66, DOI: 10.36622/VSTU. 2921.83.1.01.
10. В. Л. Мартынов, Ю. Л. Сиек, А. Н. Борисов. Методика практического расчёта телевизионных коммуникаций подводных аппаратов // Морские интеллектуальные технологии. Т. 3. № 2. Т. 3. ISSN № 2588-0233, ISSN № 2073-7173, 2021. – С. 117-123.

References

1. A. N. Dmitriev. Proektirovanie podvodnyh apparatov [Design of underwater vehicles]. Leningrad, izd. «Sudostroenie», 1978, 240 s.
2. Protokol zasedaniya NTS VPK RF № 10 (91) ot 04.04.2017 g. na temu: «Nauchno-tehnicheskie problemy sozdaniya avtonomnyh istochnikov elektropitaniya dlitel'nogo sroka sluzhby» [Scientific and technical problems of creating autonomous power sources with a long service life].
3. V.A.Abchuk, V.G.Suzdal'. Poisk ob"ektov [Search for objects]. Moscow, izd. «Sovetskoe radio», 1977, 334 s.
4. L.A.Emel'yanov i dr. Teoriya poiska v voennom dele [The theory of search in military affairs]. Moscow, izd. «Voenizdat», 1964, 208 s.
5. R.F.Zhukov, A.A.Kondratovich i dr. Sistemy, pribory i ustrojstva podvodnogo poiska [Underwater search systems, instruments and devices]. Moscow, izd. «Voenizdat», 1972, 184 s.
6. V.A.Abchuk, F.A.Matvejchuk, i dr. Vvedenie v teoriyu vyrabotki reshenij [Introduction to the theory of decision making]. Moscow, izd. «Voenizdat», 1972, 344 s.
7. V.I.Dikarev i dr. Metody i sredstva obnaruzheniya ob"ektov v ukryvayushchihsya sredah [Methods and means of detecting objects in hiding environments]. Saint-Petersburg, izd. «Nauka i tekhnika», 2004, 280 s.
8. V. L. Martynov, M. V. Dmitriev, V. N. Prohorov. Osnovy raschyota televizionnyh sistem podvodnogo videniya [Fundamentals of calculation of underwater vision television systems]. Trudy Vserossijskoj konferencii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki» (GA - 2020), Saint-Petersburg, izd. «Politekh-press», 2020, s. 262-266.
9. Martynov V.L., Golosnoy A.S., Sergeev S.M. Besprovodnoj opticheskij kanal svyazi v gidrosfere kak al'ternativa svyazi po kabelyu [Wireless optical communication channel in the hydrosphere as an alternative of communication by cable]. Sistemy upravleniya i informacionnye tekhnologii. №1 (83). 2021. S. 63-66, DOI: 10.36622/VSTU. 2921.83.1.01.
10. V. L. Martynov, YU. L. Siek, A. N. Borisov. Metodika prakticheskogo raschyota televizionnyh kommunikacij podvodnyh apparatov, Morskie intellektual'nye tekhnologii [Methodology of practical calculation of television communications of underwater vehicles]. Т. 3. № 2. Т. 3. ISSN № 2588-0233, ISSN № 2073-7173, 2021, s. 117-123.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктор Леонидович Мартынов, доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru

Николай Михайлович Божук, кандидат педагогических наук, заведующий кафедрой, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: kaf_rmf@gumrf.ru

Геннадий Васильевич Ильин, старший преподаватель, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: kaf_rmf@gumrf.ru

Victor L. Martynov, professor, Dr.Sci.(Eng), Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru

Nikolay M. Bozhuk, head of department, Ph.D. (Edu), Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya 5/7, St. Petersburg 198035, Russian Federation, e-mail: kaf_rmf@gumrf.ru

Gennady V. Ilyin, senior lecturer, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya 5/7, St. Petersburg 198035, Russian Federation, e-mail: kaf_rmf@gumrf.ru

Эмилия Владимировна Кречетова, аспирант, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: emi.krechet@icloud.com

Марианна Станиславовна Шиманская, аспирант, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, ассистент, Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, e-mail: shimanskii@inbox.ru

Галина Станиславовна Шиманская, старший преподаватель, Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, e-mail: galya.shimanskaya@list.ru

Emilia V. Krechetova, graduate student, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: emi.krechet@icloud.com

Marianna S. Shimanskaya, graduate student, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, assistant, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2nd Krasnoarmeyskaya str., 4, St. Petersburg, 190005, Russian Federation, e-mail: shimanskii@inbox.ru

Galina S. Shimanskaya, senior lecturer, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2nd Krasnoarmeyskaya str., 4, St. Petersburg, 190005, Russian Federation, e-mail: galya.shimanskaya@list.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.02.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.02.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 26.02.2023.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING

Научная статья

УДК 656.61.052: 629.123: 004.021

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.020>

Принципы автоматического мониторинга и контроля движения судна в режиме реального времени

В.В. Астреин¹ Astrein-vadim@rambler.ru, В.И. Филатов¹ Filatov_viktor1994@mail.ru

¹Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск

Аннотация. Данная статья является продолжением исследований по проблемам разработки системы поддержки принятия решений безопасности судовождения (СППР) [1]. Первоосновой СППР является система автоматического мониторинга и контроля безопасности судовождения реального времени (САМК СБС) [2,3]. В этой области отсутствуют не только сопоставимые исследования, но даже отсутствует структурная концепция автоматического мониторинга и контроля движения судна в режиме реального времени. Поэтому направленность этой статьи заключается в рассмотрении совокупности некоторых принципов, которая определяет пути развития управляемой архитектуры автоматического мониторинга и контроля движения судна в режиме реального времени. Структура модели САМК СБС в режиме реального времени и пример вычислительного кластера для решения задачи внутренней безопасности судна, приведенные в статье, рассматриваются как основа создаваемой архитектуры системы реального времени. Важной функцией компьютерной системы является непрерывный мониторинг за судами, окружающей средой и внутренними системами судна для обнаружения аномального или опасного состояния. На основании измерительной информации САМК СБС, разрабатываемый подход позволяет достигать безопасности систем в режиме реального времени.

Ключевые слова: автономное судовождение, СППР, концепция мониторинга и контроля движения судна в режиме реального времени, управляемая по времени архитектура, управление по событию, управление по времени, структурное построение вычислительного кластера для решения задачи в режиме реального времени.

Для цитирования: Астреин В.В., Филатов В.И. Принципы автоматического мониторинга и контроля движения судна в режиме реального времени. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 158—168. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.020

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.020>

Principles of automatic monitoring and control ship movements in real time

Vadim V. Astrein¹ Astrein-vadim@rambler.ru, Viktor I. Filatov¹ Filatov_viktor1994@mail.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. This article is further research on the development of the Navigation Safety Decision Support System (DSS) [1]. The fundamental basis of the DSS is the System of automatic monitoring and control of Navigational Safety in real time (SAMK RT) [2,3]. In the above-mentioned scientific field neither related researches nor the structural concept of automatic monitoring and control of the movement of a ship in real time exist. Thus, the spotlight subjects of this article concentrated on principles that determine the development of a Controlled-architecture for automatic monitoring and vessel's movement control in real time. The structure of the SAMK RT model in real time and the example of a computing Cluster for solving the problem of the internal ship's Safety, highlighted in this article, and considered as the basis of the real-time system architecture that should be developed to manage the monitoring and control. An important function of the computer system is the continuous monitoring of ships, the environment and the ship's internal systems to detect abnormal or dangerous conditions. Based on the measurement information of the SAMK SBS, the developed solution performs to achieve the safety of systems in real time.

Keywords: autonomous navigation, DSS, the concept of real-time monitoring and control of vessel movement, time-driven architecture, event-triggered control, time-triggered control, structural construction of a computing cluster for real-time problem solving.

For citation: 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. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.020

Введение

Разработки в области технических систем, действующих в режиме реального времени, имеют особую актуальность, в связи с поставленными

задачами ИМО, постепенного перехода на автономное судовождение. [4] Однако в настоящее время, в подавляющем большинстве случаев, мониторинг состояний процессов функционирования в системе безопасности судовождения (СБС)

автоматизирован лишь частично. Как правило, судоводителю представляется смысловая информация только о состояниях отдельных элементов СБС, а не контроля состояния судна в целом. Глобальная (общая) задача безопасности судна определена в [5] и достигается решением задач во внутренней и внешней структуре судна:

$$ЗПР_{СБС} = (ЗПР_{ВБ}, ЗПР_{НБП}, ЗПР_{ПСС}) \quad (1)$$

где: $ЗПР_{СБС}$ – глобальная (общая) задача обеспечения безопасности СБС, $ЗПР_{ВБ}$ – задача обеспечения безопасности Системы внутренней структуры судна, $ЗПР_{НБП}$ – задача обеспечения безопасности Системы навигационной безопасности судна, $ЗПР_{ПСС}$ – задача обеспечения безопасности Системы предупреждения столкновений судов.

Безопасность в задачах судовождения достигается распределено по каждой системе и/или кооперативным циклическим решением совместных задач [2]:

$$(ЗПР_{ВБ}, ЗПР_{НБП} \vee ЗПР_{ВБ}, ЗПР_{ПСС}) \quad (2)$$

Если сделать некоторый временной срез всех параметров судна, то можно описать его текущее состояние, записав значения его переменных в момент времени (t_i). Возможными переменными состояния судна могут быть: положение в географическом районе плавания, скорость, курс, положение поршня в цилиндре главного двигателя, координаты встречного судна и т.д. Поэтому разрабатываемая САМК СБС, являющаяся элементом СППР безопасности судовождения, должна уметь целостно анализировать многочисленные контекстные условия процессов динамического взаимодействия элементов внутренних и внешних систем судна в режиме реального времени с целью его безопасной эксплуатации. В области исследований автоматического мониторинга СБС в литературе отсутствуют не только сопоставимые исследования, но отсутствует концепция автоматического мониторинга и контроля движения судна в режиме реального времени.

Исследования по системам автоматического мониторинга и контроля безопасности технических объектов в режиме реального времени приобрели особое значение в начале 70-х годов прошлого века в связи с широким распространением и использованием компьютерной техники [6] в работах российских [7-12] и зарубежных ученых [13-17]. Эти работы направлены на этапы проектирования и функционирования автоматических систем мониторинга, в ходе которых осуществляется анализ измерительной информации с целью оценивания состояний (технических состояний) объектов и анализа сложных технических систем.

Среди существующих систем сбора данных и управления можно отметить системы типа SCADA-системы (Supervisor Control And Data Acquisition — системы сбора данных и управления, системы операторского интерфейса и т.п.) [18-19] с соответствующими визуальными средствами их разработки и сопровождения — CACSD (Computer Aided Control System Designer — средства визуального проектирования SCADA-систем). Однако SCADA-системы зачастую мало пригодны для решения комплекса задач САМК СБС. Это

объясняется целым рядом причин, к их числу можно отнести следующие причины: отсутствие «жесткого» режима реального масштаба времени (PMB), слишком большая универсальность SCADA-систем, обусловленная поиском со стороны фирм-производителей новых покупателей-клиентов, которая оборачивается слабой ориентацией на решение конкретных задач и невозможностью учесть специфику конкретной ПО; отсутствуют единые методологические и методические основы построения моделей, методов и алгоритмов обработки и анализа измерительной информации и т.д. [7]

Особенности структурных процессов систем реального времени

Системы реального времени делят на мягкие и жесткие системы. Разница между этими двумя типами заключается в том, насколько строгий срок выполнения процессов. [13] Если пропущенный срок только снижает производительность, но не наносит вреда, то говорят, что система является системой мягкого реального времени.

Рассматривая САМК СБС, с временной точки зрения можно выделить два типа управления: управление инициируемое событием и управление, инициируемая по времени.

Первый тип управления в САМК СБС по времени (a time-triggered (ТТ) system) инициируется периодически повторяющимся заданным тактом часов. Каждый шаг часов реального времени, начинается с запуска вычислительной задачи (логическое управление). Вычислительная модель предполагает, что задача, активированная по шагу часов реального времени (временной контроль), практически немедленно завершает свои вычисления. На практике это означает, что задача должна завершить свое выполнение до того, как следующий пусковой сигнал (следующий такт часов реального времени) инициирует следующее выполнение задачи.

Другой тип управления - по событию (event-triggered (ЕТ) control), все операции связи и обработки информации инициируются всякий раз, когда возникает опасность / угроза или значимое событие отличное от обычного состояния судна для активации соответствующей программной задачи, которая обслуживает это событие.

Мониторинг состояния внутренней структуры судна в режиме реального времени

Признаками безопасности внутренних процессов судна являются параметры, величины которых лежат около их номинальных значений, зависящих от случайных обстоятельств. Мониторинг внутреннего состояния судна, можно рассматривать в двух аспектах: с точки зрения технического состояния внутренней структуры судна и с точки зрения состояния функционирования.

При мониторинге технического состояния в основном доступны повреждения износогового вида, развитие которых сопровождается изменением рабочих параметров машин, механизмов (герметичности, зазоров и др.), т.е. свойствами обеспечивающих нормальную работу. Показатели внутренних систем никогда не могут быть в точности одинаковыми. Говорят, что они обладают

изменчивостью. Изменчивость может быть большой или малой, но она всегда есть в наличии. Другим видом изменчивости внутренних систем могут быть «неслучайные» или «особые» причины изменения процесса. К ним могут быть отнесены поломки, неисправность, качество материала и т.п.

При функциональном подходе внутренняя структура судна рассматривается как единая система, обеспечивающая процессы движения, управления и маневрирования судном (2). При функциональном мониторинге контролируются все выходные параметры (например, температура выхлопных газов, расход топлива и т.д.). Поддержание этих параметров в требуемых пределах осуществляется в основном за счет регулировки или обслуживания машин и оборудования.

Исходя из представленных рассуждений, каждый из функциональных параметров (s_1, s_2, \dots, s_m), формирующих представление о техническом состоянии внутренней структуры судна, зависит от внутренних параметров (x_1, x_2, \dots, x_n) и ограничений (v_1, v_2, \dots, v_n), которые представляют собой подзадачи:

$$\begin{aligned} s_1 &= S_1(x_1, x_2, \dots, x_n, v_1, v_2, \dots, v_n), \\ s_2 &= S_2(x_1, x_2, \dots, x_n, v_1, v_2, \dots, v_n), \\ &\dots \\ s_j &= S_j(x_1, x_2, \dots, x_n, v_1, v_2, \dots, v_n). \end{aligned} \quad (3)$$

Поскольку внутреннее состояние судна описывается не одним, а целой совокупностью параметров, то при обработке сигналов требуется использовать большое число разнообразных процессов мониторинга. Процесс управления безопасной работой внутренних систем заключается в обнаружении статистической изменчивости, вызванной случайными причинами. При определении приемлемого уровня изменчивости любые отклонения от него считают результатом действия особых причин, которые следует выявить, исключить или ослабить.

Большинство систем, связанных с безопасностью внутренней структуры судна, можно отнести либо к системам управления, либо к системам защиты.

Системы мониторинга и контроля, решающие ЗПР_{ВВ}, работающие в режиме жесткого времени, должны обнаруживать и сообщать о возникновении опасности во внутренней структуре судна. Кроме того, они должны обнаруживать и отображать аварийные сигналы, должны помогать оператору в определении основного события, которое было первоначальной причиной этих аварийных сигналов.

На судах есть системы, состояние которых важнее, чем всех остальных: Система управления по курсу (СУК); Система управления скоростью (СУВ) [20]; подруливающие устройства, относящиеся к вспомогательным управляющим средствам (ВУС), т.е. задача мониторинга и контроля этих систем должна осуществляться всегда для определения их состояния и динамики. Коммуникационная сеть является основой контроля состояния этих систем по времени. Протокол, запускаемый по времени (the time-triggered protocol (ТТР)), обеспечивает синхронизированную по времени передачу сообщений и циклическое планирование прикладных задач. Работа коммуникационной системы,

иницируемая исключительно временем, означает, что любая деятельность определяется течением (глобально синхронизированного) времени. Отправка, получение или любое другое действие зависит от предопределенного расписания и от текущего состояния часов. Сообщение А, например, отправляется с интервалом (Δt), а сообщение В отправляется при ($\Delta t + 1$). Если суммируется весь коммуникационный трафик, то в таком расписании получается детерминированная и предсказуемая коммуникационная матрица.

Необходимая информация об этих системах может быть отображена на каждом узле в коммуникационной сети. [16]. Например, турбоагнетатели основного и вспомогательного двигателей на судах для перевозки СПГ требуют непрерывного проведения измерений в Распределенной системе управления судном (DCS) для обеспечения немедленной выдачи сигнала предупреждения о неожиданных отклонениях параметров турбоагнетателей. Измеряемая информация автоматически передается на сервер баз данных и подключается к DCS, которая также позволяет сравнивать эксплуатационные параметры: частоту вращения двигателя, данные по вибрации и др.

Другой пример – надежность подруливающего устройства определяется полной системой мониторинга для каждого подшипника и редуктора. ТТР с этой задачей справляется лучшим образом: может осуществлять мониторинг не только уровней вибрации в подшипниках и редукторах, но и уровней загрязнения масла и температуры.

Если мы свяжем системы внутренней структуры судна, запускаемые по времени (главный двигатель, подруливающее устройство и др.), то архитектура с запуском по времени может обеспечить основу для проектирования надежной монолитной системы внутренней структуры судна в режиме реального времени по критически важному оборудованию. С помощью современных технологий внедрить такой режим относительно легко, особенно, когда источником всемирного времени является Глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС). По сигналам всемирного времени и синхронизации часов в разных узлах по специальному распределенному алгоритму ТТР, ТТР будет запускаться всеми активными узлами в сети.

Другой вид обеспечения безопасности в ЗПР_{ВВ} — это система типа SCADA, которая используется для обнаружения отказов по событию. Её основная функция — это регистрация всех событий, происходящих в системе. SCADA-системы относятся к системам мягкого реального времени по событию, они обнаруживают недостаточный или высокий уровень топлива, масла, давления и т.д. Информация с этих устройств собирается и обрабатывается локальными интеллектуальными устройствами – контроллерами, вычислителями, устройствами сбора и передачи данных. На этом уровне производится первичная обработка поступивших данных и локальное управление: регулирование, контроль защит, выполнение алгоритмов. Информация с контроллеров передается на сервер, обрабатывается, сводится, архивируется, анализируется и передается на автоматизированные рабочие места — (АРМы), где и выдается оператору.

Мониторинг задач движения судна в режиме реального времени

Задача навигационной безопасности судна ЗПР_{НБП} заключается в движении по заранее заданной траектории, которая может быть определена как:

$$S = \langle i, \varphi, \lambda, v, t, \psi, D, [l^+, l^-] \rangle \quad (4)$$

где: i – номер путевой точки поворота (WP); (φ, λ) – географические координаты, ψ – локсодромическое направление между соседними WP; D – локсодромическая дистанция между соседними WP; $[l^+, l^-]$ – допустимые границы коридора безопасности (справа и слева от линии заданного пути), нахождение в котором гарантирует обеспечение ЗНБП, представляющие из себя перпендикулярное смещение относительно линии курса (ХТЕ); v – вектор скоростей прохождения каждого отрезка пути; t – вектор моментов прохождения WP.

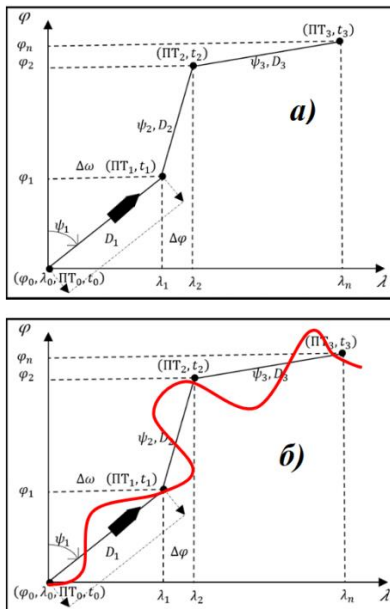


Рис. 1. а) Заданная траектория движения, б) Реальная траектория движения судна

Автоматизация решения задачи вождения по маршруту «от WP к WP» сводится к определению (ХТЕ) и расчетом оптимального курса ($K_{опт.}$) для возвращения на заданный курс (K_3). Поправка (ΔK) к курсу (K_3) находится в зависимости от величины бокового отклонения ХТЕ судна от линии пути. Она обеспечивает возвращение судна на линию пути при появлении отклонения от нее. Величина бокового отклонения ХТЕ при автоматической проводке судна по маршруту измеряется с помощью приемодикатора ГНСС. В условиях возмущенной ионосферы – во время захода и восхода Солнца и в период магнитных бурь радиальная СКП определения места может достигнуть величины $M_{взм} = 8-10$ м. [21] Радиальная СКП измерения вектора истинной скорости судна в условиях спокойной ионосферы составляет величину $M_v = 0,1 \div 0,2$ уз. Кроме координат места судна, ГНСС предоставляет значения путевого угла и путевой скорости судна. Частота обновления информации у судовых приемодикаторов лежит в диапазоне 1 с.

Высокочастотная составляющая погрешности приемодикаторов ГНСС незначительна, т.е. информация не нуждается в дополнительном сглаживании. Кроме того, ГНСС позволяет установить угол сноса ($c = \text{ПУ} - K_3$) и использовать его значение как (ΔK). Коэффициент пропорциональной компоненты управления в общем случае зависит от допустимого отклонения ($XTE_{доп.}$) от отрезка маршрута и может быть представлен в виде [22]:

$$a_1 = \frac{\tilde{a}_1}{XTE_{доп.}} \quad (5)$$

a_1 – нормированный коэффициент.

Если задавать курс авторулевому (K_a) с точностью до градуса, то поправку к по информации ГНСС можно получать по формуле:

$$U = \text{ROUND} \left(\frac{\tilde{a}_1}{XTE_{доп.}} XTE + \Delta K \right) \quad (6)$$

Для возвращения на (K_3) возникает переходный процесс. При этом на вход исполнительного усилителя рулевой машины поступает значение угла перекладки (γ_3). Рулевая машина начинает перекладку руля, которая продолжается до тех пор, пока рассогласование между заданным (K_3) и фактическим курсами (K_a) не исчезнет (т.е. $K_3 = K_a$).

Режим авто проводки по маршруту «от WP к WP» последовательно применяется после каждого поворота на новый отрезок маршрута [23], начиная от момента включения этого режима после прохождения точки поворота.

Задача вождения по маршруту «от WP к WP» является типичной задачей управления по времени, когда ведется непрерывный контроль проводки судна по маршруту. После запуска задачи «от WP к WP» система предоставляет данные, характеризующие его прохождение по маршруту: боковое смещение от линии пути (ХТЕ), расстояние (DTG), пеленг (BRN) и расчетное время (TTG) движения до активной путевой точки, ожидаемое время прибытия в нее (ETA). Индицируются также курсы активного и следующего за ним отрезка маршрута.

В отличие от режима «от WP к WP» выполнение поворотов можно рассмотреть, как задачу управления по событию. При движении по активному отрезку маршрута в системе непрерывно контролируется расстояние от места судна до активной WP. Событие наступает тогда, когда расстояние до активной точки WP станет равным (s_{Δ}) и авторулевому дается команда выполнить поворот требуемым образом. Судно не всегда попадает в WP из-за влияния окружающей среды на движение судна, а попадает в окрестность этой WP (рисунок 2).

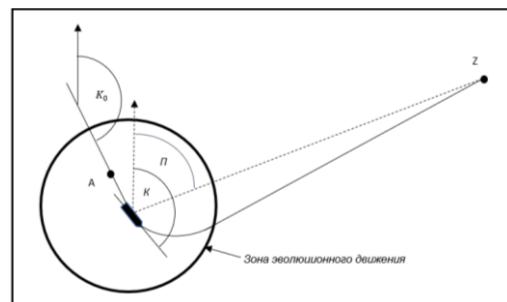


Рис. 2 - Поворот на курс к точке A

Область, на границе которой начинается поворот, называют зоной эволюционного движения. Поэтому для достижения наилучшего результата вождения по маршруту, каждый раз система должна пересчитывать параметры поворота. Допустим, когда судно находилось в точке (A) (рисунок 2) включился режим «поворот» и была выбрана функция «с заданной угловой скоростью» (ω_3) для поворота на курс (K) к точке (Z). С момента включения режима «поворот» через малый интервал времени (Δt), вычислительная система начинает рассчитывать пеленг (Pi) на точку (Z) по алгоритму:

$$\text{IF } |\Pi_i - K_i| > \delta, \text{ THEN } K_{3,i} = K_{3,i-1} + \omega_3, \text{ ELSE} \\ K_{3,i} = \Pi_i - c. \quad (7)$$

где: δ - малая величина; K_i - значение текущего курса; $K_{3,i}$ - значение заданного курса; Π_i - значение текущего пеленга на точку (Z).

Авторулевой переключает руль для обеспечения равенства (K_i) и ($K_{3,i}$). В этот период траектория движения судна из прямолинейной превращается в криволинейную с центром кривизны со стороны противоположного борта стороне переключки руля. Скорость судна начинает уменьшаться. Концом поворота считается момент, когда в первый раз условие $|\Pi_i - K_i| > \delta$ не выполняется. После этого по алгоритму (7) находят значения ($K_{3,i}$) для движения по направлению к точке (Z). Значения пеленга на точку (Z) в этом случае исправляются поправкой на угол сноса (c). После завершения поворота (события) система переводится в режим стабилизации курса, соответствующего новому направлению отрезка маршрута. Таким образом «поворот» является управлением по событию.

ЗПР_{НБП} можно описать циклическим решением двух задач: «от WP к WP» и выполнением поворотов. Для исполнения этих задач используются разные алгоритмы. Цель задачи «от WP к WP» - как можно точнее держаться заданного курса ($K_{3,i}$), применяя методы параметрической адаптации, связанные с коррекцией, подстройкой параметров модели (6) введением поправки рассчитанной по результатам информации ГНСС. Адаптация позволяет подстраивать модель на каждом шаге управления, причем исходной информацией для нее является рассогласование отклика движения судна «от WP к WP» и математической модели, устранение которого и реализует процесс адаптации.

Для осуществления поворота при переключке руля происходит изменение цели движения - выход на новый курс. Для решения этой задачи требуется не адаптация, а эволюция модели движения судна. Эволюционный период поворота — это время от момента переключки руля и момента, когда элементы движения примут установившийся характер, при этом наблюдаются: увеличение угла дрейфа, кривизны траектории, уменьшение скорости хода и как следствие изменения угловой скорости и курса судна. После чего система опять перестраивается на решение новой задачи «от WP к WP». Если система будет использовать по-прежнему «чужие» алгоритмы, то это проявляется в так называемой разладке, когда прежняя модель становится неадекватной реальному процессу.

Следовательно, для обеспечения безопасности движения судна модель ЗПР_{НБП} должна всякий раз перестраивать алгоритмы движения на основании циклической решаемой задачи «от WP к WP» → Поворот → «от WP к WP» и т.д.

Исходя из особенностей структурных процессов реального времени, ЗПР_{НБП} представляется управлением по времени, когда необходимо постоянно контролировать положение судна относительно заданного курса и управление по событию, когда судно достигло зоны эволюционного движения и выполнило поворот для выхода на новый курс.

Мониторинг задач предупреждения столкновений судов в режиме реального времени.

ЗПР_{ПСС} заключается в наблюдении за судами, определении опасности и предупреждении столкновения судов.

Задача наблюдения и определения опасности столкновения судов. Обычно в некотором географическом районе плавания одновременно могут находиться {M} судов. Тогда для решения ЗПР_{ПСС} необходим мониторинг (постоянное наблюдение) не за одним, а за множеством судов. По оценке векторов их относительного движения в некотором районе плавания ($\{\bar{B}_m(c)\}$; 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 $[\bar{b}_{ji}(\bar{C}_{ji})]$ такие, что:

$$\text{Если } [b_{ji}(\bar{C}_{ji})] > [\bar{b}_{ji}(\bar{C}_{ji})], \text{ то } [b_{ji}(\bar{C}_{ji})] = 1 \\ \text{Если } [b_{ji}(\bar{C}_{ji})] < [\bar{b}_{ji}(\bar{C}_{ji})], \text{ то } [b_{ji}(\bar{C}_{ji})] = 0 \quad (8)$$

«Опасность столкновения» существует, когда пороговое значение определяется как 1, и если 0, то «опасности столкновения нет». Особенности информации для предупреждения столкновений судов. Удобно мониторинг за {M} судами осуществлять по часам всемирного времени встроенных в Автоматическую идентификационную систему (АИС). АИС выдает координаты судна с признаком точности менее или более 10 метров. АИС, как средство мониторинга и слежения за судами, позволяет обрабатывать свыше 4000 донесений в минуту и обновлять содержание сообщений каждые две секунды; использует технические средства самоорганизующегося множественного доступа с временным уплотнением, обеспечивая устойчивую и надежную работу при высокой скорости обмена данными и высокой плотности судов.

Совместное использование АИС на судах позволяет реализовать явные преимущества по надежности, достоверности идентификации судов в сравнении с другими существующими средствами навигации. 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 радиолокационных станций, что

позволяет уменьшить задержку в распознавании маневра судна. 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. Это позволяет осуществить постоянное слежение за движением судов, аналогичное автоматическому сопровождению с помощью РЛС/САРП [24,25].

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 1), коими РЛС/САРП не обладают.

Таблица 1

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 (гироскопа), подключенного к аппаратуре АИС
Угловая скорость	Скорость поворота (изменения курса). Автоматически считывается с соответствующего датчика, если он имеется на судне

По таблице 1 последовательность наблюдений за суднами будет складываться во времени сразу из нескольких величин, получаемых АИС. Тем не менее существенных результатов можно достигнуть и при изучении только одного, отдельно взятого временного ряда некоторого параметра - координат судна, определенных в соответствии с периодом передачи информации станцией АИС. Контрольные участки (периоды) приема динамической информации покажем в таблице 2.

Таблица 2

Контрольные участки (периоды) приема динамической информации АИС и ГНСС

Источник информации	T, с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	V, уз										
АИС	3-14										*
	0-14 (К)			*			*			*	
	14-23 (К)		*		*		*		*		*
ГНСС	-	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

При получении текущих координат места судна от ГНСС и АИС временной ряд о движении будет неполным (с не равноотстоящими уровнями по времени). Поэтому реальные модели движения одиночного судна или плавания в группе судов лучше всего привести к одному интервалу получения сообщений, строить в системе точных обсерваций (φ, λ) по ГНСС и АИС, но с периодичностью по АИС, указанной в Таблице 2. Собственные координаты ГНСС (φ, λ) регистрирует с дискретностью 1 с. Следовательно, для исследования движения судов целесообразно выбрать АИС и ГНСС в качестве основных поставщиков информации и ограничиться временными рядами, представляющими собой дискретную последовательность наблюдений, производимых через регулярные промежутки времени (3, 6, 9 или 10 секундные интервалы). Для улучшения прогноза динамики движения судов следует из предложенного перечня выбрать минимальный доступный интервал наблюдений в 3 с, который подходит для любого судна вне зависимости от его скорости. Таким образом решается проблема точности и периодичности выдачи информации. Кроме того, при таком подходе в модели мониторинга движения судна будут учитываться факторы непосредственного и опосредованного влияния на движение судна по заданной траектории и наиболее точно отражать реальное движение судна.

Алгоритмы предупреждения столкновений судов

При существовании опасности столкновения применяются алгоритмы МППСС-72. Отношение порядка между судами восстанавливаются в зависимости от маневренных возможностей судов (разнородных). Расхождение разнородных судов на безопасном расстоянии выполняется в условиях, когда одно из судов обладает преимуществом перед другим. Логика расхождения судов состоит в том, что судно с лучшими маневренными возможностями уступает дорогу, менее маневренному. Если существует опасность столкновения однородных судов, то используется принцип взаимного геометрического положения судов, который позволяет распознавать ситуацию сближения судов, обозначать судно, обладающее приоритетом при расхождении, а также сформировать сценарии, соответствующие понятиям: обгон; прямо или почти прямо по носу; пересечение курсов; судно, уступающее дорогу; судно, которому уступают дорогу. Для каждой ситуации существуют факторы, позволяющие вычислительно идентифицировать тот, или иной сценарий и выработать решение в соответствии с МППСС-72. Среди действий для предупреждения столкновений судов могут быть: изменение курса и/или скорости (В-маневр) [26].

Таким образом, 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), а маневр расхождения назначается в зависимости от ситуации встречи судов (ситуационное управление).

Использование протоколов мониторинга и контроля в задачах безопасности судовождения

Общая безопасность судна ЗПР_{СБС} (1) обеспечивается реконфигурацией своей структуры (2). [2] Проблема решается в соответствии с возникшей ситуацией, угрожающей безопасности судна в каждой из систем (1) с использованием протоколов управления по времени (ТТР) и управления по событиям (CAN).

Системы задачах ЗПР_{СБС}, запускаемые по протоколу ТТР, должны ответить на запрос о безопасности в predetermined моменты времени. Системы с запуском по времени подходят для периодических жестких задач в реальном времени и передачи информации о состоянии критически важных в отношении безопасности систем.

Протокол (CAN) (Controller Area Network), напротив, должен реагировать на внешние события, которые наступают время от времени. Сеть CAN состоит из узлов с интерфейсом CAN и соединяющей их шины CAN. Шина является широкоэвещательной, т. е. все узлы получают все сообщения, даже если они не адресованы им. CAN запускается событием, что означает, что узлы будут отправлять сообщения при возникновении события внутри узла. Если датчик получает указание на то, что контролируемый параметр изменился, то этот узел отправит сообщение по шине. Если, например, решаются две ситуационные задачи (ЗПР_{НБП}, ЗПР_{ПСС}) одновременно, то это может привести к конфликтам сообщений, так как каждый узел может отправить сообщение об опасности на шину одновременно. Чтобы справиться с этим, CAN использует метод CSMA/AMP (Carrier Sense Multiple Access with Arbitration by Message Priority) (Множественный доступ с арбитражем по приоритету сообщения). В CSMA/AMP каждому отправляемому сообщению назначается приоритет. Если конфликт обнаружен после начала отправки сообщения, все узлы, кроме узла, отправляющего сообщение с наивысшим приоритетом, должны прекратить отправку. Решение о том, какое сообщение имеет наивысший приоритет, принимается на этапе арбитража.

Протокол CAN достаточно хорош для ситуационных (ЗПР_{НБП}, ЗПР_{ПСС}) реального времени, но для ситуаций, развивающихся слишком быстро (ЗПР_{ВБ}), подход, запускаемый по событию, слишком слаб.

Система, управляемая событиями, более гибкая и более адаптивна к изменению характеристик системы. Однако такие системы при работе страдают от значительных временных издержек из-за более сложных алгоритмов планирования, чем в случае запускаемых по времени. Связь в распределенной системе реального времени может быть классифицирована как иницируемая событием, начинающаяся, когда поступает команда send (отправь) или наступает время запуска, при котором сообщения отправляются периодически. В целом триггерный подход по событиям удобен при решении ЗПР_{НБП} и ЗПР_{ПСС}. С другой стороны, метод с временным срабатыванием подходит для детерминированных (ЗПР_{ВБ}), которые имеют известные наборы задач с заранее известными алгоритмами. В общем случае ЗПР_{СБС} будет иметь

компоненты, запускаемые и по времени, и по событиям. [27, 28]

Структурная модель САМК СБС в режиме реального времени

САМК СБС состоит из трех кластеров (набора связанных компонент), сгруппированных вместе для достижения общей цели: СБС (судно, окружающая среда и другие суда), «распределенная компьютерная подсистема (киберсистема, поведение которой регулируется программами, исполняемыми на цифровых компьютерах), и человек-пользователь или оператор. В дополнение к набору компонентов кластер должен содержать систему внутри кластерной связи, обеспечивающую обмен сообщениями между компонентами кластера. Распределенная вычислительная система состоит из вычислительных узлов, которые взаимодействуют путем обмена сообщениями. Вычислительный узел может содержать один или несколько вычислительных компонентов.

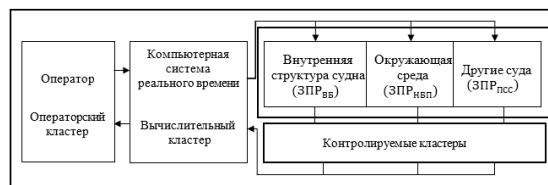


Рис. 3 - Структура модели САМК СБС в режиме реального времени

Компоненты и сообщения. В САМК СБС компонент — это автономная программно-аппаратная единица, взаимодействующая со своим окружением исключительно посредством обмена сообщениями. Компонент состоит из проекта (например, программного обеспечения) и варианта осуществления (например, аппаратного обеспечения, включая процессор, память и интерфейс ввода/вывода). Компонент реального времени содержит часы реального времени. После включения часов компонент переходит в состояние готовности к запуску, ожидая триггерный сигнал, указывающий на начало выполнения вычислений компонента. Всякий раз, когда возникает сигнал запуска, компонент начинает свои predetermined вычисления. Затем считывает входные сообщения и свое внутреннее состояние, создает выходные сообщения и обновленное внутреннее состояние и так далее. Затем он снова переходит в состояние готовности к запуску, чтобы дожидаться следующего запускающего сигнала.

Кластеры компонентов. В рассматриваемой САМК СБС под кластером понимается набор связанных компонентов, сгруппированных вместе для достижения общей цели. САМК СБС обладает свойством реконфигурировать свою структуру на выполнение функциональных задач таким образом, чтобы подсистемы (1) могли на различных интервалах времени находиться в пассивном или активном режиме, т.е. должна происходить динамическая декомпозиция САМК СБС. Полученные в результате структуры (ЗПР_{ВБ}, ЗПР_{НБП} и ЗПР_{ПСС}) рассматриваются как ситуационные мониторинговые модели, отражающие состояние судна при плавании среди навигационных

опасностей или предупреждения столкновения судов. В дополнение к набору компонентов образующиеся кластеры должны содержать систему внутри кластерной связи, обеспечивающую передачу сообщений между компонентами кластера.

Вычислительный кластер. Компоненты, формирующие вычислительный кластер, имеют общий архитектурный стиль. На рисунке 4 покажем пример вычислительного кластера для решения (ЗПР_{ВВ}). Этот кластер состоит из вычислительного компонента, вспомогательной системы, систем ввода / вывода, Системы управления судном, состоящей из СУК – системы управления курсом, СУВ – системы управления скоростью, ВУС – вспомогательной системы управления и шлюза, получения информации о параметрах состояния компонентов кластеров (ЗПР_{НБП}) и (ЗПР_{ПСС}).

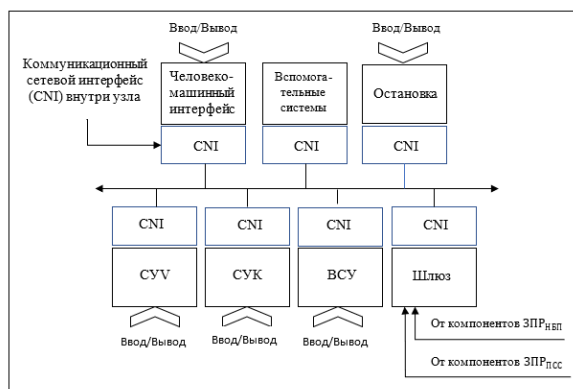


Рис. 4. Пример вычислительного кластера для решения (ЗПР_{ВВ})

При разработке вычислительного кластера для решения ЗПР_{ВВ} система должна решать ряд задач управления курсом, скоростью и мониторинга аварийных сигналов, возникающих в СУК, СУВ и ВУС. Четкое различие между этими задачами требует тщательного определения понятий временного контроля и логического контроля.

Временной контроль связан с определением моментов реального времени, когда должны быть выполнены вычисления, т. е. когда задачи должны быть активированы.

Логическое управление определяется структурой задачи и конкретными входными данными, чтобы система могла реализовать желаемые вычисления.

Важным принципом модели вычислительного кластера для решения ЗПР_{ВВ} является разделение временных и логических задач. Процесс реального времени разделяется на (бесконечную) последовательность интервалов заданной продолжительности реального времени (шагами). Каждый шаг начинается с запуска вычислительной задачи (логическое управление). Вычислительная модель предполагает, что задача, активированная по шагу часов реального времени (временной контроль), практически немедленно завершает свои вычисления. На практике это означает, что задача должна завершить свое выполнение до того, как следующий пусковой сигнал (следующий такт часов реального времени) инициирует следующее выполнение задачи.

Заключение

Непрерывная адаптация и модификация, необходимые для поддержания эффективности такой большой и сложной системы как САМК СБС, приводят к растущей сложности, которой трудно управлять в монолитном контексте. Один из методов решения проблемы сложности САМК СБС состоит в том, чтобы разбить единую большую монолитную систему на набор автономных составных систем (1), соединенных четко определенными интерфейсами обмена сообщениями [29]. Любая реконфигурация (2) тщательно координируется. Координатор отслеживает и координирует эволюцию САМК СБС. Такая технология может справиться с ростом сложности САМК СБС путем применения принципов упрощения, разделения задач и наблюдаемости взаимодействия систем. САМК СБС требует привязки ко времени, наличие синхронизированного глобального времени во всех составных системах САМК СБС приводит систему к «архитектуре по времени», где глобальное время может быть установлено по сигналам ГНСС.

Глобальная или общая безопасность в СБС реального времени может быть достигнута двумя противоречивыми требованиями: по времени и по событию. Анализ показывает, что САМК СБС должна быть реализована как распределенная система, в которой набор вычислительных узлов соединен между собой. Каждый узел выполняет набор задач, вносящих определенную функциональность в общую систему управления безопасностью СБС по различным протоколам: ТТР и CAN. Отдельные задачи взаимодействуют друг с другом (2), а результаты одной задачи могут быть переданы для решения задач в другие узлы. Возможность жесткого реального времени по протоколу ТТР может быть гарантирована для систем, имеющих критически важное значение в СБС: Системе управления по курсу (СУК); Системе управления скоростью (СУВ); Вспомогательным управляющим средствам (ВУС). Спецификация ТТР не допускает какой-либо гибкой связи в сети. Разрешены только предварительно определенные коммуникационные временные интервалы связи. Таким способом достигается безопасность при решении ЗПР_{ВВ}. Процессы ЗПР_{НБП}, ЗПР_{ПСС} также могут включать протоколы ТТР при отслеживании параметров движения судна относительно заданного пути в режиме «от WP к WP» или, например, отслеживать параметры движения других судов и возникновение опасности столкновения. Протокол CAN реализуется событиями, генерируемый спонтанными сообщениями по безопасности во всех системах СБС и требует высокой гибкости сети. В CAN доступ к CAN-шине контролируется логикой арбитража, которая предполагает наличие на шине рецессивного и доминантного состояний.

САМК СБС является распределенной системой, которая состоит из автономных компьютеров, каждый из которых способен функционировать в одиночку. Эти компьютеры связаны сетью и взаимодействуют, выполняя глобальную задачу и делясь ресурсами. САМК СБС является распределенной вычислительной системой, которая работает с ограничениями по времени. Предпочтительной средой взаимосвязи систем для построения САМК СБС является Интернет, что

приводит к Интернету вещей, позволяющего исключить человека из части действий и операций по уменьшить влияние «человеческого фактора» или управлению судном.

Литература

1. Симанков, В.С. Основные методологические аспекты организации и функционирования систем поддержки принятия решений безопасности судовождения / В.С. Симанков, В. В. Астреин Эксплуатация морского транспорта. № 2(79). 2016. – С. 56-64.
2. Астреин В.В., Филатов В.И. Ситуационная модель автоматического мониторинга безопасности судовождения. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 174—184.
3. Астреин В.В., Филатов В.И. Методологические положения разработки автоматического мониторинга безопасности судовождения. Морские интеллектуальные технологии. 2022. N (3-1) 57. С. 188—197
4. Maritime Safety Committee (MSC), 100th session, 3-7 December 2018 <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-100th-session.aspx>
5. Астреин В.В. Методологические основы распределенной автоматизированной системы управления безопасностью судовождения. Эксплуатация морского транспорта № 3(96), Новороссийск, РИО ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2020. С. 59-64
6. Lehman M.M and Ramil J.F, An Approach to a Theory of Software Evolution, IWPSE 2001, Vienna, 10-11 Sept. 2001 Also in Proc. IWPSE 2001, IEEE CS Press, Los Alamitos, CA, 2002
7. Охтилев, М. Ю., Б. В. Соколов. Новые информационные технологии мониторинга и управления состояниями сложных технических объектов в реальном масштабе времени Труды СПИИРАН. Вып. 2, т. 2. — СПб.: Наука, 2005
8. Охтилев, М.Ю. Соколов, Б.В. Юсупов, Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
9. Майданович, О. Охтилев, М.Ю. Соколов Б. В Перспективные направления развития информационных технологий мониторинга и управления состояниями сложных технических объектов в реальном масштабе времени. International Journal "Information Models and Analyses" Vol.1 / 2012
10. Охтилев, М. Ю. О построении программ обработки и анализа измерительной информации в реальном времени // Программирование. Том 27. № 6. 2001. — С. 329–335.
11. Охтилев, М. Ю. Особенности технологии проектирования специализированных систем для автоматизированного анализа измерительной информации реального времени // Автоматика и вычислительная техника. 2001. № 6. — С. 13–18.
12. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В. Теоретические и прикладные проблемы разработки и применения автоматизированных систем мониторинга состояния сложных технических объектов // Труды СПИИРАН / Под редакцией доктора технических наук, профессора Юсупова Р.М. Выпуск 1. Том 1. СПб.: СПИИРАН, 2002. — С. 167–180.
13. Kopetz H. Real-Time Systems Design Principles for Distributed Embedded Applications Second Edition Springer; 2nd ed. 2011 edition, P. 378
14. Goodloe, A., Lee Pike. Monitoring Distributed Real-Time Systems: A Survey and Future Directions National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center Hampton, Virginia, 2010. P. 50
15. Jahanian, F. Rajkumar, R. and Raju, S.. Run-time monitoring of timing constraints in distributed real-time systems. Real-Time Systems Journal, 7(2):247–273, 1994
16. Kopetz H. The Time-Triggered Approach to Real-Time System Design; H. Kopetz, TU-Wien;
17. Kopetz H. ТТР – A Protocol for Fault-Tolerant Real-Time Systems; H. Kopetz, G. Grünsteidl; IEEE Computer; January 1994, pp. 14-23.
18. Зюзов А. М. Нестеров К. Е. Головин И. С. SCADA-системы Учебное электронное текстовое издание. ГОУ-ВПО УГТУ-УПИ, Екатеринбург, - С. 24.
19. Андреев Е.Б. SCADA-системы: взгляд изнутри/Е.Б. Андреев, Н.А. Куцевич, О.В. Синенко. – М.:Издательство «РТСофт», 2004 – 176 с.: ил.
20. Ивановский, В.Г. Мониторинг рабочего процесса судовых дизелей в эксплуатации. Двигатели внутреннего сгорания №2, 2004. – С.138-141
21. ГОСТ 32455—2013 Глобальная навигационная спутниковая система. Морская навигационная аппаратура потребителей. Приемные устройства
22. Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управления движением судна. – 3-е изд., перераб. и доп.- Одесса: Фенікс, 2007. – 328 с.
23. Pettersen K. Y. and Lefeber E. Way-point tracking control of ships. In Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, 2001.
24. ГОСТ Р МЭК 60945—2007 Морское навигационное оборудование и средства радиосвязи. Общие требования. Методы испытаний и требуемые результаты испытаний
25. ИМО А.917(22) от 29 ноября 2001 г. Руководство по эксплуатации АИС на судах
26. Вагущенко Л.Л., Вагущенко А.Л. Поддержка решений по расхождению с судами: Фенікс, 2010. – 229 с.
27. К. Эрджиес Распределенные системы реального времени. Теория и практика / пер. с англ. В. А. Яроцкий. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 382 с.: ил.
28. Lee Pike. Modeling time-triggered protocols and verifying their real-time schedules. In FMCAD'07: Proceedings of Formal Methods in Computer Aided Design, pages 231–238 IEEE, 2007 Available at http://www.cs.indiana.edu/~lepik/pub_pages/fmcad.html. Best Paper Award.
29. Lehmann M.M. & Belady, L. (1985). Program Evolution: Processes of Software Change. Academic Press.

References

1. Simankov, V.S. Osnovnye metodologicheskie aspekty organizatsii i funktsionirovaniya sistem podderzhki prinyatiya resheniy bezopasnosti sudovozhdeniya [Basic aspects of management and performance of DSS]. V.S. Simankov, V. V. Astrein Ekspluatatsiya morskogo transporta. № 2(79). 2016. – S. 56-64.
2. Astrein V.V., Filatov V.I. Situatsionnaya model' avtomaticheskogo monitoringa bezopasnosti sudovozhdeniya [Automatic situational monitoring System for Navigation Safety]. Morskoe intellektual'nye tekhnologii. 2022. № 2 chast' 1. S. 174—184.
3. Astrein V.V., Filatov V.I. Metodologicheskie polozheniya razrabotki avtomaticheskogo monitoringa bezopasnosti sudovozhdeniya. Morskoe intellektual'nye tekhnologii [Provisions and methods for the development of automatic monitoring of navigation safety]. 2022. N (3-1) 57. S. 188—197
4. Maritime Safety Committee (MSC), 100th session, 3-7 December 2018 <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-100th-session.aspx>
5. Astrein V.V. Metodologicheskie osnovy raspredelennoy avtomatizirovannoy sistemy upravleniya bezopasnost'yu sudovozhdeniya [Methodological basics of automated control system for safety of navigation]. Ekspluatatsiya morskogo transporta № 3(96), Novorossiysk, RIO GMU im. adm. F. F. Ushakova, 2020. S. 59-64
6. Lehman M.M and Ramil J.F, An Approach to a Theory of Software Evolution, IWPSE 2001, Vienna, 10-11 Sept. 2001 Also in Proc. IWPSE 2001, IEEE CS Press, Los Alamitos, CA, 2002
7. Okhtilev, M. Yu., B. V. Sokolov. Novye informatsionnye tekhnologii monitoringa i upravleniya sostoyaniyami slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov v real'nom masshtabe vremeni [New informational technologies of monitoring and control of condition for difficult technical objects in online-mode]. Trudy SPIIRAN. Vyp. 2, t. 2. — SPb.: Nauka, 2005
8. Okhtilev, M.Yu. Sokolov, B.V. Yusupov, R.M. Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov [IT monitoring and control structural dynamics of difficult technical objects]. M.: Nauka, 2006. 410 s.
9. Maydanovich, O. Okhtilev, M.Yu. Sokolov B. V Perspektivnye napravleniya razvitiya informatsionnykh tekhnologiy monitoringa i upravleniya sostoyaniyami slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov v real'nom masshtabe vremeni [Prospects and directions of development of programs for analysis and assessment on-line data]. International Journal "Information Models and Analyses" Vol.1., 2012
10. Okhtilev, M. Yu. O postroenii programm obrabotki i analiza izmeritel'noy informatsii v real'nom vremeni. Programirovanie [Development of programs for analysis and assessment on-line data]. Tom 27. № 6. 2001. — S. 329–335.
11. Okhtilev, M. Yu. Osobennosti tekhnologii proektirovaniya spetsializirovannykh sistem dlya avtomatizirovannogo analiza izmeritel'noy informatsii real'nogo vremeni [Specific of management and development of automatic monitoring systems]. Avtomatika i vychislitel'naya tekhnika. 2001. № 6. — S. 13–18.
12. Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V. Teoreticheskie i prikladnye problemy razrabotki i primeneniya avtomatizirovannykh sistem monitoringa sostoyaniya slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov [Theoretical and practical problems of management and implementation of automatic monitoring systems]. Trudy SPIIRAN . Pod redaktsiey doktora tekhnicheskikh nauk, professora Yusupova R.M. Vypusk 1. Tom 1. SPb.: SPIIRAN, 2002. — S. 167–180.
13. Kopetz H. Real-Time Systems Design Principles for Distributed Embedded Applications Second Edition Springer; 2nd ed. 2011 edition, R. 378
14. Goodloe, A., Lee Pike. Monitoring Distributed Real-Time Systems: A Survey and Future Directions National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center Hampton, Virginia, 2010. P. 50
15. Jahanian, F. Rajkumar, R. and Raju, S. Run-time monitoring of timing constraints in distributed real-time systems. Real-Time Systems Journal, 7(2):247–273, 1994
16. Kopetz H. The Time-Triggered Approach to Real-Time System Design; H. Kopetz, TU-Wien;
17. Kopetz H. TTP – A Protocol for Fault-Tolerant Real-Time Systems; H. Kopetz, G. Grünsteidl; IEEE Computer; January 1994, pp. 14-23.
18. Zyuzev A. M. Nesterov K. E. Golovin I. S. SCADA-sistemy Uchebnoe elektronnoe tekstovoe izdanie [SCADA-systems]. GOU-VPO UGTU-UPI, Ekaterinburg, - C. 24.
19. Andreev E.B. SCADA-sistemy, vzglyad iznutri [SCADA-systems, internal overview]. E.B. Andreev, N.A. Kutsevich, O.V. Sinenko. – M.: Izdatel'stvo «RTSoft», 2004 – 176 s.: il.
20. Ivanovskiy, V.G. Monitoring rabocheho protsessa sudovykh dizeley v ekspluatatsii. Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Monitoring of Ship's engine working process]., №2, 2004. – S.138-141
21. GOST 32455—2013 Global'naya navigatsionnaya sputnikovaya sistema. Morskaya navigatsionnaya apparatura potrebiteley [GNSS]. Priemnye ustroystva
22. Vagushchenko L.L., Tsybmal N.N. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna [Automatic control systems of Ship's Movement]. – 3-e izd., pererab. i dop. - Odessa: Feniks, 2007. – 328 c.
23. Pettersen K. Y. and Lefeber E. Way-point tracking control of ships. In Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, 2001.
24. GOST R MEK 60945—2007 Morskoe navigatsionnoe oborudovanie i sredstva radiosvyazi [Marine navigation and communication equipment]. Obshchie trebovaniya. Metody ispytaniy i trebuemye rezul'taty ispytaniy
25. IMO A.917(22) ot 29 noyabrya 2001 g. Rukovodstvo po ekspluatatsii AIS na sudakh [AIS management]
26. Vagushchenko L.L., Vagushchenko A.L. Podderzhka resheniy po raskhozheniyu s sudami [Ship's maneuvering decision support]., Feniks, 2010. – 229 c.
27. K. Erdzhies Raspredelennye sistemy real'nogo vremeni [Distribution Real-Time systems]. Teoriya i praktika. per. s ang.V. A. Yarotskiy. – M.: DMK Press, 2020. – 382 s.: il.

28. Lee Pike. Modeling time-triggered protocols and verifying their real-time schedules. In FMCAD'07: Proceedings of Formal Methods in Computer Aided Design, pages 231–238 IEEE, 2007 Available at http://www.cs.indiana.edu/~lepik/pub_pages/fmcad.html. Best Paper Award.
29. Lehmann M.M. & Belady, L. (1985). Program Evolution: Processes of Software Change. Academic Press.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ О Б АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Вадим Викторович Астреин, доктор технических наук, капитан дальнего плавания, профессор кафедры «Судовождение», государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. E-mail: Astrein-vadim@rambler.ru.

Vadim V. Astrein, Dr. Sci. (Eng)s, Master Marine, Professor of the Department of Navigation, Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. E-mail: Astrein-vadim@rambler.ru.

Виктор Иванович Филатов, преподаватель-исследователь, научный сотрудник, государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. E-mail: Filatov_viktor1994@mail.ru.

Viktor I. Filatov, post-graduate researcher, scientific staff, 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 15.01.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 16.01.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 18.01.2023.

Научная статья

УДК 656.6.058

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.021>

Анализ проблемы поиска морских судов небольшого водоизмещения в районе ответственности арктических спасательных центров

М.Л. Маринов¹ marinlmsky@gmail.com, Д.А. Скороходов¹ skorohodda@mail.ru,
М.С. Галиев¹ maxgaliev@yahoo.com

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация: Проведенные до сих пор эксперименты по исследованию параметров дрейфа морских судов небольшого водоизмещения на мелководье наводят на некоторые выводы, меняющие логику их поиска и спасения, заложенную в международных правилах и руководствах. Экспериментальное исследование проводилось поэтапно. На основе проделанной работы можно заключить, что Международное руководство по поиску и спасению судов на море (IAMSAR) может использоваться для поиска судов небольшого водоизмещения, терпящих бедствия на море только в ситуациях с небольшим опозданием сигнала об аварии. Предлагаемые в руководстве способы и критерии не учитывают специфику поведения судов небольшого водоизмещения при продолжительном дрейфе и не соответствуют всем возможным ситуациям по их поиску. Существуют и другие проблемы, усложняющие организацию поиска, как например: точность данных о ветре и волнении, предоставляемых метеослужбой, недостаточная для поиска морских судов небольшого водоизмещения; сигнал бедствия поступает со значительным опозданием; сведения о течениях в мелководных районах зоны проведения поисковой операции, полученные путем численного моделирования и годового среднестатистического характера, могут не удовлетворять требуемой точности для выполнения расчетов и другие. В связи с этим, необходимо проводить систематические замеры, обработку и хранение этих параметров в единой базе данных. На основе анализа ситуаций с морскими судами небольшого водоизмещения, терпящих бедствие и проведенных экспериментов, может быть обоснован и предложен условный дифференцированный подход к планированию их поиска, учитывающий особенности их поведения при дрейфе.

Ключевые слова: водные, дрейф, интеллектуальная, море, поиск, принятия решений, суда, система, транспортные.

Для цитирования: Маринов М.Л., Скороходов Д.А., Галиев М.С. Системный анализ поиска морских судов небольшого водоизмещения в районе ответственности арктических спасательных центров, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 169—174. DOI:10.37220/MIT.2023.59.1.021

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.021>

Analysis of the problem of searching for small displacement sea vessels in the area of responsibility of Arctic rescue centers

Marin L. Marinov¹ marinlmsky@gmail.com, Dmitriy A. Skorokhodov¹ skorohodda@mail.ru,
Maxim S. Galiev¹ maxgaliev@yahoo.com

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, Russian Federation

Abstract: The experiments conducted so far to study the parameters of the drift of small displacement vessels in shallow water suggest some conclusions that change the logic of their search and rescue, laid down in international rules and guidelines. The experimental study was conducted in stages. Based on the work done, it can be concluded that the International Guidelines for the Search and Rescue of Ships at Sea (IAMSAR) can be used to search for vessels of small displacement that are in distress at sea only in situations with a slight delay in the signal of an accident. The methods and criteria proposed in the manual do not take into account the specifics of the behavior of small displacement vessels during prolonged drift and do not correspond to all possible situations for their search. There are other problems that complicate the organization of the search, such as: the accuracy of wind and wave data provided by the weather service is insufficient to search for small displacement vessels; the distress signal arrives with a significant delay; information about currents in shallow areas of the search operation zone obtained by numerical modeling and annual average may not meet the required accuracy for performing calculations and others. In this regard, it is necessary to carry out systematic measurements, processing and storage of these parameters in a single database. Based on the analysis of situations with small displacement vessels in distress and conducted experiments, a conditional differentiated approach to planning their search can be justified and proposed, taking into account the peculiarities of their behavior during drift.

Key words: water, transport, ship, drift, search, sea, intelligent, system, decision making.

For citation: Marin L. Marinov, Dmitriy A. Skorokhodov, Maxim S. Galiev. Systematic analysis of the search for sea vessels of small displacement in the area of responsibility of the Arctic rescue centers, 2023. № 1 part 1, P. 169—174. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.021

Введение

За последние годы вопросами поиска бедствующих судов и людей уделяется все большее внимание. В соответствии с современными требованиями конвенции (SAR 79, SOLAS), все суда определенных категорий должны иметь на борту коммуникационные средства - бортовую аппаратуру GMDSS (Всемирная морская система бедствия и безопасности). Эта система должна обеспечить автоматическую подачу сигнала тревоги, определение местоположения терпящего бедствие объекта с минимальным временем задержки сигнала, осуществление надежной коммуникации при проведении операции по поиску и спасению на основе интегрированного использования космических и наземных коммуникаций.

Вне этих категорий, в районе ответственности арктических спасательных центров МЧС России останется большое количество морских судов небольшого водоизмещения (МС НВ), которые не снабжены аппаратурой связи в системе GMDSS или вообще не имеют никаких средств связи на борту.

В своем большинстве это находящиеся в условиях дрейфа рыболовные, транспортные, пассажирские и другие суда, яхты, шхуны, катера, шлюпки, плавающие средства для развлечения и отдыха, бедствующие в море авиационные средства и др.

К этой категории необходимо перечислить и людей в индивидуальных средствах спасения (ИСС) и свободно дрейфующие опасные морские объекты (ОМО) - дрейфующие мины; дрейфующие буи; опасные ледовые скопления; крупные плавающие предметы; неопознанные объекты, несущие угрозу и др.).

Системный анализ поиска морских судов небольшого водоизмещения в районе ответственности арктических спасательных центров

В настоящее время, особенностям осуществления поиска бедствующих морских судов небольшого водоизмещения в мелководных районах, какими являются районы ответственности арктических спасательных центров МЧС России, уделяется недостаточное внимание [1, 3, 4]. В то же самое время, именно для них бедствие в море очень часто становится по-настоящему борьбой за жизнь. И для этого есть достаточно предпосылок.

Районы ответственности арктических спасательных центров МЧС России, которые в большинстве своем являются мелководными районами, отличаются еще и следующими особенностями:

- недостаточной развитостью инфраструктуры и оборудования средствами навигационных ограждений;
- значительной удаленности Арктического спасательного центра (АСЦ) МЧС России друг от друга;
- отсутствием постоянной системы мониторинга и оповещения о состоянии ветра $V_{вт}$, волнения $V_{вл}$, течения V_t и передвижения льда $V_{л}$ в открытом море;
- частыми неблагоприятными погодными условиями;

- тенденцией к потеплению климата и увеличением количества судов небольшого водоизмещения, занятых перевозками;

- возможными провокационными действиями со стороны других государств с использованием диверсионных групп, минного оружия, мини подводных лодок, судов для разведки и подрывных действий.

Сущность проблемы планирования поиска морских судов небольшого водоизмещения состоит в том, что характерные особенности их дрейфа, не исследованы в достаточной степени. Кроме того, процесс планирования поиска морских судов небольшого водоизмещения недостаточно обоснованно ставится под общим знаменателем с системой планирования поиска объектов большего размера, включенных в систему GMDSS.

Анализ случаев бедствий за период более 10 лет в болгарской мелководной зоне ответственности [2, 5] показывает, что примерно 75% из всех случаев бедствий на море происходит с морскими судами (МС) малого водоизмещения (МВ), которые не включены в систему GMDSS. Из их числа более 50% - это суда, на борту которых полностью отсутствуют средства связи.

Полученные результаты показывают, что самым большим является число бедствующих судов в прибрежной зоне, где порядка 80% из всех случаев это МС МВ. В зонах, расположенных на дистанции от 5 до 12 миль от берега, доля бедствующих МС МВ без средств связи составляет порядка 65%.

Размеры районов, в которых осуществлялся поиск МС МВ, обычно имеют радиус более 10 миль в более 60% всех случаев, предварительная информация об их местоположении и состоянии является неполной в более 50% случаев, а в 20% - она полностью отсутствует.

Из всех случаев, порядка 20 - 25% заканчиваются гибелью судна и экипажа или они не обнаруживаются до окончания поисковой операции.

Изучение характеристик дрейфа МС МВ, терпящих бедствие на море, позволяет вывести следующие возможные особенности их поведения в районах ответственности арктических спасательных центров МЧС России:

- в большинстве из описанных случаев будут отсутствовать точные данные о местоположении объектов, их состоянии, намерениях и др.;

- эти объекты не смогут передавать актуальную информацию о гидрометеорологических условиях в районе бедствия, что будет вести к неточности в расчетах по их поиску еще в самом начале;

- возможности устранения возникшей аварии или перехода на резервные средства управления и движения у МС МВ обычно будут отсутствовать или будут минимальными. Это будет вызывать продолжительный дрейф судна под воздействием ветра, течения и волнения;

- МС МВ отличаются небольшими размерами корпуса и надстройки, что будет вести к затруднениям в обнаружении визуальными и техническими средствами;

- выраженная повышенная зависимость дрейфа МС МВ от воздействия ветра, волнения и течений, предполагает точное знание их параметров в конкретном районе за длительный период до

проведения операции, а такие данные обычно отсутствуют;

- значительная часть ситуаций бедствия с МС МВ будет отличаться большим интервалом задержки сигнала бедствия и неточностью первичных данных об их местоположении;

- поиск МС МВ в районах ответственности арктических спасательных центров МЧС России, чаще всего будет проводиться в обширных районах, на эффективное обследование которых средств поиска обычно не будет хватать.

Обобщенный анализ условий, которые определяют аэронавигационный дрейф авиационных объектов, бедствующих над морской акваторией, дает основания предположить, что ожидаемая неточность расчетов по их поиску будет сравнимой с той, которая характерна для поиска малых морских объектов. Исходя из размеров ожидаемых районов поиска, повышенной зависимости дрейфа от гидрометеорологических факторов и небольших размеров дрейфующих в море судов, суда с экипажами бедствующих авиационных средств, тоже должны быть причислены к категории МС МВ.

На базе проведенных теоретических и экспериментальных исследований особенностей дрейфа МС МВ в мелководных районах моря и выявления закономерностей их поиска, можно сделать некоторые обобщенные выводы [2, 8, 11]:

- поведение дрейфа МС МВ в мелководных районах моря различается существенно от поведения дрейфа судов с большими размерами. Эти наблюдения предопределяют разный подход к планированию и проведению их поисковых операции;

- траектории дрейфа МС МВ в мелководных районах моря могут быть в виде секторов, полос большой длины, или сложных зигзагообразных кривых незакономерного характера. У них возможно резкое маневрирование в одну или другую сторону, дрейф по кругу или возвращение в первоначальную точку после продолжительного времени;

- высокая степень неопределенности и отсутствия информации сделает крайне сложным точное фиксирование границ района их вероятного местонахождения (РВМНХ) и будет резко понижать эффективность проведения поисковых мероприятий;

- установленное, в процессе работы влияние волнения на формирование траекторий дрейфа МС МВ, подтверждает значимость его учета для повышения точности процесса планирования поиска. Из-за повышенного влияния волнения, отклонения МС МВ от предполагаемого места в мелководных районах моря, могут быть значительными. Учет вектора волнового течения может изменить в значительной степени проводимые расчеты направления и скорости дрейфа;

- в ходе проведенных экспериментов с МС МВ, дрейфующими в мелководных районах моря, наблюдается возможность незакономерного характера изменения направления ветрового дрейфа и его отклонения от направления ветра порядка 30° - 80° и более. Этот факт ведет к пересмотру логики его учета и требует дополнительных исследований проблемы и коррекции существующей методики;

- точность данных о ветре и волнении, по данным метеослужбы, достаточна для поиска малых объектов, о которых сообщили с опозданием не более 1-2 часов. Эти данные будут непригодны для планирования поиска продолжительно (более 24 часов) дрейфующих МС МВ в мелководных районах ответственности арктических спасательных центров МЧС России.

Для обеспечения поиска МС МВ в подобных ситуациях необходимо использовать гидрометеорологические данные, либо с автоматизированной климатической спутниковой системы, либо измеренные в данном конкретном районе непосредственно до начала поиска. Данные о ветре и течении по среднегодовым статистическим данным и полученные в результате численного моделирования, не смогут быть использованы для поиска бедствующих малых объектов в мелководных районах. Для выяснения конфигурации и поведения поверхностных течений в них необходимы дополнительные исследования [2, 9, 10, 12].

На основании проделанного комплексного анализа информации о поведении поверхностных течений в других мелководных районах моря, могут быть сделаны важные практические выводы, которые могут изменить общепринятую логику проведения операции по поиску МС МВ в мелководных районах ответственности арктических спасательных центров МЧС России [2, 4, 6, 7].

Так, например:

- исследование и анализ движения поверхностных течений в морских мелководных зонах в настоящее время недостаточны, но независимо от этого можно сделать предварительные выводы, что никакие из наблюдаемых поверхностных течений в этих зонах в действительности не могли быть определены как „постоянные“. На практике все течения в мелководных морских зонах имеют сложную и невыясненную конфигурацию и поведение и данные о них не смогут быть использованы для организации поиска МС МВ в мелководных районах ответственности арктических спасательных центров МЧС России;

- “постоянные” поверхностные течения могут быть только течения с относительно неизменными параметрами - направление и скорость. В мелководных зонах таких практически нет, а в глубоководных зонах необходимо учитывать перемещение их осей и изменение их параметров в зависимости от сезонов года и изменений климата;

- во время обработки данных о поверхностных течениях, в интересах поиска МС МВ, необходимо обратить особое внимание на научные разработки, связанные с исследованием вихревых образований водных масс циклонального и антициклонального характера (в зависимости от сезона). Наблюдения показывают, что в области континентального шельфа изменение направления и скорости ветрового воздействия очень часто приводит к возникновению слабоустойчивых, вихревых, или с непостоянным направлением поверхностных течений, которые могут легко менять свои параметры.

На основании сделанных выше предположений можно сказать, что модели Международного руководства по поиску и спасению (IAMSAR) можно

использовать для ведения поиска бедствующих МС МВ с небольшим запаздыванием сигнала бедствия и ожидаемой относительно прямолинейной траекторией дрейфа. Предлагаемые в нем способы и критерии не учитывают все особенности продолжительного дрейфа таких объектов и не соответствуют всем возможным ситуациям их поиска.

На основе анализа ситуаций с МС МВ, терпящих бедствие и проведенных экспериментов, может быть обоснован и предложен условный дифференцированный подход к планированию их поиска, учитывающий особенности их поведения при дрейфе.

На базе вышеуказанного подхода могут быть обоснованы новые критерии оценки и может быть разработана Интеллектуальная система поддержки принятия решений координаторами поиска МС МВ в мелководных районах ответственности арктических спасательных центров МЧС России.

В методике поиска в рамках Интеллектуальной системы поддержки принятия решений координаторами поиска может быть охвачен весь диапазон поисковых ситуаций с равномерным и неравномерным распределением места объекта, терпящего бедствия и могут быть предложены варианты по применению разнообразных способов, дающих возможность для продолжительного обследования вероятной полосы передвижения объекта.

Дифференцированный подход планирования поиска МС МВ в мелководных районах ответственности арктических спасательных центров МЧС России базируется на следующих принципах:

- учет специфики МС МВ, терпящих бедствия;
- оценку обстановки и классификацию ситуаций поиска МС МВ, исходя из выявленной специфики;
- использование моделей поиска применимых ко всему диапазону установленных поисковых ситуаций, например - способы избирательного обследования, продолжительный поиск в вероятном секторе движения, поиск на линии и др.;
- комбинированное использование надводных и авиационных средств поиска при ведущей роли надводных средств наблюдений;
- комплексное использование визуальных и технических средств поиска и другие.

Для большей полноты в отражении специфики поисковых ситуаций с бедствующими МС МВ, из теории поиска могут быть введены следующие условные понятия, которые в настоящее время не используются в практике спасения бедствующих объектов, как например:

- «обстановка в районе поиска» - включает информацию о времени и месте инцидента, гидрометеорологической обстановке, состоянии и поведении объекта;
- «условия проведения поиска» - включает данные об обстановке и расчеты элементов дрейфа и размеров района поиска;
- «поисковая ситуация» - включает обстановку в районе поиска, условия проведения поиска и стоящие перед наблюдателями задач.

Разрабатываемая в рамках Интеллектуальной системы поддержки принятия решений, Методика планирования МС МВ, терпящих бедствие на море,

будет включать следующие основные этапы планирования поиска:

1. Оценка условий для проведения поиска.
 - 1.1 Оценка обстановки в поисковом районе:
 - метеорологическая оценка района;
 - оценка состояния и поведения морских судов небольшого водоизмещения;
 - оценка места аварии;
 - оценка времени.
 - 1.2 Оценка элементов дрейфа и размеров района вероятного местонахождения бедствующих МС МВ:
 - вычисление вероятной ошибки местоположения морских судов небольшого водоизмещения;
 - вычисление размеров района поиска;
2. Принятие решения о поиске.
 - 2.1 Определение ситуации поиска;
 - 2.2 Вычисление критериев эффективности и выбор способа поиска в соответствии с данной ситуацией;

Оценка обстановки в районе поиска МС МВ может проводиться по четырем основным группам параметров:

- по данным о времени инцидента и времени запаздывания сигнала бедствия;
- по данным о месте инцидента;
- по данным о ветре, течении и волнении моря в районе поиска;
- по данным о состоянии и поведении бедствующего судна.

Расположение и первоначальные размеры района вероятного местонахождения бедствующего МС МВ зависят преимущественно от состояния информации по первым двум группам параметров, которые можно считать «основными», но отсутствие достаточно точной информации по другим показателям может привести к значительной неточности расчетов, или к грубым ошибкам, предопределяющим не успешность операции еще в самом начале

Исходя из указанных задач можно предложить следующую классификацию обстановки при поиске морских судов небольшого водоизмещения в мелководных районах ответственности арктических спасательных центров МЧС России:

1. Исходя из точности данных о времени бедствия и местоположении аварийного объекта:
 - о времени и месте бедствия имеется точная информация;
 - о времени имеется точная информация, а о месте имеются приблизительные данные;
 - точно известно местоположение суда, но не имеется информации о времени аварии;
 - о времени и месте бедствия есть точная информация, но контакт потерян;
 - о времени и месте бедствии можно только предполагать.
2. Исходя из точности данных о ветре, волнении моря и течениях в районе инцидента:
 - данные о ветре, волнения и течений являются точными;
 - данные о ветре, волнения и течений являются приблизительными.
3. Исходя из наличия информации о потере контакта с объектом:

- контакт с бедствующим объектом поддерживается постоянно (периодически);
- контакт с бедствующим объектом потерян.

Заключение

На основании сделанных выше заключений о возможностях применения существующих методик для поиска морских судов небольшого водоизмещения, терпящих бедствия на мелководье, можно сказать следующее.

Международное руководство по поиску и спасению судов на море (IAMSAR) может использоваться для поиска МС МВ, терпящих бедствия на море в ситуациях с небольшим опозданием сигнала об аварии. Предлагаемые в руководстве способы и критерии не учитывают полностью специфику поведения МС МВ при продолжительном дрейфе и не соответствуют всем возможным ситуациям по их поиску.

Точность данных о ветре и волнении, предоставляемых метеослужбой, не достаточна для поиска МС МВ. Сигнал бедствия поступает с большим запаздыванием. Для малых судов, дрейфующих продолжительно, необходимо использовать данные автоматизированной спутниковой системы вместе с непосредственным замером параметров, воздействующих гидрометеорологических факторов в районе бедствия.

Сведения о течениях в мелководных районах зоны проведения поисковой операции, полученные путем численного моделирования и годового среднестатистического характера, могут не удовлетворять требуемой точности для выполнения расчетов. В связи с этим, необходимо проводить систематические замеры и обработку их параметров в единой базе данных.

Анализ проблемы поиска бедствующих МС МВ в мелководных районах ответственности арктических спасательных центров МЧС России, показывает необходимость проведения систематических теоретических и экспериментальных научных исследований, направленных на:

- теоретическое и экспериментальное изучение специфики формирования траекторий дрейфа и поведения разного типа МС МВ в мелководных районах ответственности арктических спасательных центров МЧС России во время бедствия;
- проведение углубленного анализа ситуации их поиска;
- исследование влияния ветра, волнения и течения на дрейф каждой группы МС МВ в конкретном районе ответственности;
- усовершенствование математических моделей методики поиска с учетом специфики для каждой категории МС МВ;
- усовершенствование методик обоснования эффективности проводимых операций в зависимости от условий в районе бедствия и используемых способов обследования;
- разработку базы данных для автоматизированной обработки результатов поиска, терпящих бедствие малых объектов;
- исследование возможностей использования инфракрасной аппаратуры и приборов ночного видения в операциях по поиску малых объектов;
- разработку новых научно обоснованных моделей комбинированного поиска продолжительно дрейфующих малых объектов морскими и авиационными средствами.

Литература

1. Гроздев Д. С. Некоторые характеристики ветрового волнения в Болгарской зоне ответственности // диссертация, г. Варна, 2001. С. 67 – 84.
2. Маринов М. Л. Метод и алгоритмы при планиране на търсенето на бедстващи малки обекти на море (в условията на Българския отговорен район) // диссертация, г. Варна, С. 2005. С. 112 – 144.
3. Маринов, М. Л. Особенности в оценката на ситуацията при планиране на търсенето на бедстващи, малки обекти без средства за свързка в Българския отговорен район. // сборник научных трудов Технического университета г. Варны, Варна, 2001 С. 786 – 792.
4. Маринов, М. Л. Проблемные вопросы и алгоритмы методики планирования поиска водных транспортных средств малого водоизмещения // Проблемы безопасности и чрезвычайные ситуаций. М.: ВИНТИ. 2010. №4. С. 98 – 111.
5. Маринов, М. Л. Статистика действительных случаев поиска и спасения на море в Болгарском районе ответственности // сборник МСКЦ, г. Варна. 2001. С. 28-63.
6. Рубинщайн Д.Н. Поиск аварийных объектов в море // М.: Министерство транспорта, 1992.
7. Сазонов А.Е., Буканов И.П. Оценка среднего времени поиска терпящих бедствие на море // СПб.: Навигация и океанография. 2001. №1.
8. Тружчев Д., Станев Е., Русенов В., Циркуляция вод и численное моделирование течений Черного моря // София: СУ. 1988. С. 15 – 19.
9. Физикогеографическая характеристика болгарской акватории Черного моря // Гидрографическая служба, г. Варна, 1999.
10. Belberov Z., Cherneva Zh., Kostichkova D., Davidan I., Lavrenov Y., Lopatochkin L., Verification of the hibrid wave model far the Western Black Sea // j. Black Sea 1997 No 2 P. 11 – 17.
11. International aeronautical and maritime search and rescue manual (IAMSAR) // vol. I, YMQ/YCAO, 1988. P. 53 – 59.
12. Kostichkova D., Cherneva Zh., Velcheva A., Wind wave climate of the Western Black Sea Coast // j. Black Sea, 1997, 97 - 3, P. 17 – 22.

References

1. Grozdev D. S. Some characteristics of wind waves in the Bulgarian zone of responsibility // dissertation, Varna, 2001. P. 67 – 84.
2. Marinov M. L. Method and algorithms for planning the search for distressed small objects at sea (in the conditions of the Bulgarian responsible area) // dissertation, Varna, S. 2005. P. 112 – 144.
3. Marinov, M. L. Peculiarities in the assessment of the situation when planning the search for distressed, small objects without communication means in the Bulgarian responsible area. // collection of scientific works of the Technical University of Varna, Varna, 2001 P. 786 – 792.
4. Marinov, M. L. Problem questions and algorithmic methods of planning requests for water transport means of small displacement // Problems of security and emergency situations. M.: VINITI. 2010. No. 4. P. 98 – 111.
5. Marinov, M. L. Statistics of actual cases of claims and rescues at sea in the Bulgarian district of responsibility // sbornik MSCC. the city of Varna. 2001. P. 28-63.
6. Rubinstein D.N. Search for emergency objects at sea // M.: Ministry of Transport, 1992.
7. Sazonov A.E., Bukanov I.P. Evaluation of the average time of the sea disaster // St. Petersburg: Navigation and Oceanography. 2001. №1.
8. Truhchev D., Stanev E., Rusenov V., Water circulation and numerical modeling of Black Sea currents // Sofia: SU. 1988. P. 15 – 19.
9. Physico-geographic characteristics of the Bulgarian waters of the Black Sea // Hydrographic Service, Varna, 1999.
10. Belberov Z., Cherneva Zh., Kostichkova D., Davidan I., Lavrenov Y., Lopatochkin L., Verification of the hybrid wave model far the Western Black Sea // j. Black Sea 1997 No. 2 P. 11 – 17.
11. International aeronautical and maritime search and rescue manual (IAMSAR) // vol. I, YMQ/YCAO, 1988. P. 53 – 59.
12. Kostichkova D., Cherneva Zh., Velcheva A., Wind wave climate of the Western Black Sea Coast // j. Black Sea, 1997, 97 - 3, P. 17 – 22.

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

Марин Любенов Маринов, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: marinlomsky@gmail.com

Marin L. Marinov, PhD (Eng), leading researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: marinlomsky@gmail.com

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

Максим Сергеевич Галиев, младший научный сотрудник Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: maxgaliev@yahoo.com

Maxim S. Galiev, junior researcher of the Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; maxgaliev@yahoo.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.01.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.01.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 11.02.2023.

Научная статья

УДК 62 – 51: 62 - 526: 629.423

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.022>**Сравнение законов управления неявнополюсной синхронной машиной**Ю.П. Филюшов¹ filushov@mail.ru, Б.В. Палагушкин¹ 9134889132@mail.ru, М.А. Павлова¹ info@nsawt.ru¹Сибирский государственный университет водного транспорта

Аннотация Актуальность исследований обусловлена желанием увеличить пробег механизмов с электрической тягой, работающих от аккумуляторных батарей. К таким механизмам относятся электромобили, катера речного и морского флота, подводные робототехнические системы, осуществляющие движение посредством управления тяговым электроприводом с неявнополюсной синхронной машиной, имеющей возбуждение от постоянных магнитов. Наиболее широкое распространение получило управление синхронным двигателем током по поперечной оси. Обеспечивая минимизацию тепловых потерь, такое решение характеризуется значительным ростом реактивной мощности при увеличении нагрузки и скорости, что определяет рост потерь в стали, ограничивает диапазон регулирования в области больших скоростей. В силу увеличения тепловых потерь, управление синхронной машиной при минимизации реактивной мощности в условиях ограничения напряжения и тока не нашло своего применения.

Целью работы ставится задача сравнения по энергетическим характеристикам законов управления синхронным двигателем с постоянными магнитами. Одним из основных показателей качества электропривода, работающего от автономного источника питания при ограничении тока и напряжения, подводимого к обмоткам двигателя, выступает величина максимальной мощности, которую можно передать на движение механизма. Косвенно, этот показатель может характеризовать расстояние перемещения исполнительного механизма на одной зарядке аккумулятора. Решение поставленной задачи осуществляется путём анализа состояния синхронной машины с постоянными магнитами при различном формировании управления в условиях ограничения тока и напряжения, подводимого к обмоткам двигателя от автономного источника питания.

Полученные результаты сравнения демонстрируют высокие энергетические показатели работы синхронной машины в условиях минимизации реактивной мощности.

Ключевые слова: неявнополюсная синхронная машина с постоянными магнитами, анализ законов управления, минимизация тепловых потерь, минимизация реактивной мощности.

Для цитирования: Филюшов Ю.П., Палагушкин Б.В., Павлова М.А., Сравнение законов управления неявнополюсной синхронной машиной, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 175—180. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.022

Original articleDOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.022>**Comparison of the control laws of an implicit synchronous machine**Yury P. Filushov¹ filushov@mail.ru, Boris V. Palagushkin¹ info@nsawt.ru, Marina A. Pavlova¹ info@nsawt.ru¹Siberian State University of Water Transport, Schetinkina st. main building 33. Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. The relevance of the research is due to the desire to increase the mileage of mechanisms with electric traction powered by a battery. Such mechanisms include electric vehicles, river and sea fleet boats, underwater robotic systems that receive movement by controlling a traction electric drive with an implicit synchronous machine with permanent magnets. The most widespread is the control of a synchronous motor by a current along the transverse axis. Ensuring the minimization of heat losses, such a solution is characterized by a significant increase in reactive power with an increase in load and speed, which determines the growth of losses in steel, limits the range of regulation in the area of high speeds. Due to the increase in heat losses, the control of a synchronous machine while minimizing reactive power under conditions of voltage and current limitation has not found its application. The aim of the work is to compare the energy characteristics of the control laws of a synchronous motor with permanent magnets. One of the main indicators of the quality of an electric appliance operating from an autonomous power source with limited current and voltage supplied to the motor windings is the maximum power that can be transferred to the movement of the mechanism. Indirectly, this indicator characterizes the distance to which the executive mechanism can be moved on a single battery charge. The solution of the problem is carried out by analyzing the state of a synchronous machine with permanent magnets with different control formation under conditions of current and voltage limitation supplied to the motor windings from an autonomous power source.

The obtained comparison results demonstrate high energy performance of the synchronous machine in conditions of minimizing reactive power.

Key words: Non-polar synchronous machine with permanent magnets, energy-efficient operating modes, minimization of heat losses, minimization of reactive power.

For citation: Filushov Y.P., Palagushkin B.V., Pavlova M.A., Comparison of the control laws of an implicit synchronous machine, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 175—180. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.022

Введение

В настоящее время в тяговом электроприводе подвижного состава, электромобилях с автономным источником питания, катерах речного и морского флота, подводных робототехнических систем, получающих питание от аккумуляторов, широко используются синхронные машины с постоянными магнитами (СДПМ) [1-3]. Не имея скользящих контактов и не расходуя энергию на возбуждение, СДПМ выгодно отличаются от других электрических машин [4 - 6]. Векторное управление СДПМ током по поперечной оси, система МТРА (Maximum Torque per Ampere), получило наиболее широкое распространение [7, 8]. Объясняется это достаточно простым законом управления, обеспечивающим линейную зависимость электромагнитного момента от тока. Обеспечивая минимум тепловых потерь, управление двигателем осуществляется в системе вращающихся координат d, q [9 - 11]. Несмотря на малые потери в меди, реактивная мощность растёт при увеличении нагрузки, значительно снижая эффективность управления током по поперечной оси. Рост потокосцепления статора увеличивает потери в стали. Диапазон регулирования в области высоких скоростей ограничен, мощность, передаваемая на исполнительный механизм, снижается.

Управление, обеспечивающее минимизацию реактивной мощности, устраняет многие недостатки, но потери в меди несколько больше. Поэтому такое управление не нашло своего применения. Вместе с тем работа двигателя при минимизации реактивной мощности позволит электроприводу передать исполнительному механизму большую мощность, что особенно важно при его работе от автономного источника питания. Несмотря на снижение электромагнитного момента при ограничении тока, исполнительному механизму можно передать значительно большую мощность, увеличивая угловую скорость двигателя при ограничении напряжения. Для выбора того или иного способа управления неявнополюсной синхронной машиной следует сравнить энергетические характеристики электропривода при векторном управлении током по поперечной оси и управлении двигателем в условиях минимизации реактивной мощности двигателя.

1. Постановка исследовательской задачи

Задачей работы является сравнение законов управления неявнополюсной синхронной машиной с постоянными магнитами по энергетическим критериям качества, реализация которых в алгоритмах управления повысит эффективность работы тягового электропривода с автономным источником питания.

2. Математическое описание

Решение рассмотрено на примере трёхфазного синхронного двигателя с постоянными магнитами, математическая модель которого представлена в фазовом пространстве [12-13] системы вращающихся координат d, q :

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = -ri_d + p\omega\Psi_q + U_d, \tag{1}$$

$$\frac{d\Psi_q}{dt} = -ri_q - p\omega\Psi_d + U_q, \tag{2}$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = m - m_c,$$

$$\Psi_d = L i_d + \Psi_0; \Psi_q = L i_q,$$

$$m = p \frac{3}{2} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) = p \frac{3}{2} \Psi i \cos(\varphi), \tag{3}$$

$$i = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}, \Psi = \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2},$$

$$Q = p\omega \frac{3}{2} (\Psi_d i_d + \Psi_q i_q) = p\omega \frac{3}{2} \Psi i \sin(\varphi), \tag{4}$$

$$\Delta P = \frac{3}{2} r i^2; P_c = K p^{1.5} \omega^{1.5} \Psi^2, \tag{5}$$

$\Psi_d, \Psi_q, i_d, i_q, U_d, U_q$ - проекции вектора потокосцепления статора, тока и напряжения, подводимого к обмоткам двигателя; r - активное сопротивление обмоток статора; Ψ_0 - величина потока постоянных магнитов, приведённая к параметрам обмотки статора; J - приведённый к валу двигателя момент инерции; m_c - момент статического сопротивления; ω - скорость вращения ротора; p - число пар полюсов; m - электромагнитный момент; ΔP - потери в меди; P_c - потери в стали, при достаточно точном приближении [14] можно свести к одной (5) простой эмпирической формуле; K - коэффициент характеризует уровень магнитных потерь (определён из анализа уравнений баланса мощностей электрической машины); Q - реактивная мощность (4); φ - угол, определяет положение вектора тока относительно ЭДС от потокосцепления статора.

При некотором допущении $\cos(\varphi)$ не отличается от стандартной оценки энергетических свойств работы синхронной машины, соответствующей сдвигу фазы основной гармоники напряжения питания относительно синусоидального тока статора. Поскольку в различных режимах работы потокосцепление в воздушном зазоре электрической машины с постоянными магнитами существенно не изменяется, нелинейностью характеристики намагничивания можно пренебречь. На рисунке 1 показано положение векторов СДПМ в системе вращающихся координат.

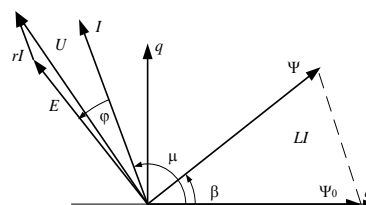


Рис. 1. Векторная схема синхронной машины с постоянными магнитами

Углы β и μ отражают положение вектора потокосцепления статора Ψ и тока I относительно потока постоянных магнитов Ψ_0 , ориентированного вдоль продольной оси d . Значение этих углов определяет состояния электрической машины и характеризует закон управления. Вектор ЭДС повернут на девяносто градусов относительно вектора потокосцепления статора. Поток постоянных магнитов ориентирован по продольной оси d вращающейся системы координат d, q .

3. Показатели качества при минимизации потерь в меди

Рассмотрим энергетические возможности работы двигателя на примере трёхфазной синхронной машины, при ограничении модуля вектора напряжения на уровне $U = \sqrt{2} U_\phi$ и управлении $i_d = 0$. Параметры двигателя приведены в таблице 1, где I_ϕ и U_ϕ фазные ток и напряжение, P_n мощность, отдаваемая исполнительному механизму на перемещение.

Таблица 1

Параметры двигателя

P_n Вт	I_ϕ А	U_ϕ В	R Ом	L мГн	$\cos(\varphi)$	Ψ_0 Вб	p
12000	174	29	0.054	0.062	0.84	0.0213	8

Для определения состояния электрической машины в зависимости от нагрузки, напряжение (1), подводимое к обмоткам двигателя в квазиустановившемся режиме, возведено в квадрат (5):

$$u^2 = r^2 i^2 + 2r\omega p \Psi_0 i + p^2 \omega^2 (\Psi_0^2 + L_q i^2), \quad (6)$$

$$\Psi_d = \Psi_0; \quad \Psi_q = Li; \quad \Psi = \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2},$$

$$\omega = \frac{\sqrt{(L^2 i^2 + \Psi_0^2) U^2 - i^4 r^2 L^2 - i r \Psi_0}}{p(L^2 i^2 + \Psi_0^2)}. \quad (7)$$

На основании уравнений (3, 4, 6, 7) определена связь функций состояния от величины тока [15 -17] при ограничении напряжения в условиях минимизации тепловых потерь. На рисунке 2 показаны функции мощности $m\omega(i)$, передаваемой исполнительному механизму, реактивной мощности $Q(i)$, максимально возможной скорости двигателя $\omega(i)$ и электромагнитного момента $m(i)$ в зависимости от тока при ограничении модуля вектора напряжения $U = 41$ [В]. Из рисунка 2 следует, при увеличении тока и росте электромагнитного момента $m(i)$ наблюдается рост реактивной мощности $Q(i)$ и снижение максимально возможной скорости двигателя. Снижение скорости определено ростом потокосцепления статора.

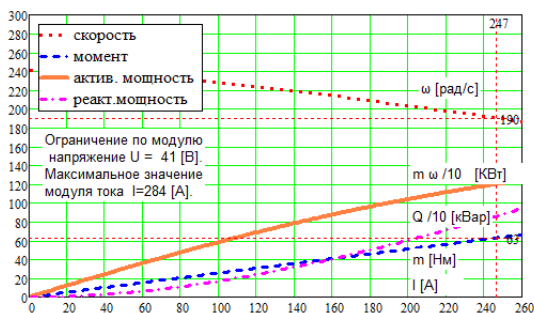


Рис. 2. Функция мощности $m\omega(i)$, передаваемой исполнительному механизму, реактивной мощности $Q(i)$ и максимально возможной скорости $\omega(i)$ в зависимости от тока при ограничении напряжения

Таблица 2

Основные характеристики электрической машины

P_n Вт	Q Вар	ω рад/с	M Нм	P_c Вт	ΔP Вт	$\cos(\varphi)$	η
12000	8700	193	63	85	494	0.84	0.95

При ограничении модуля вектора напряжения $U = 41$ В и тока на уровне $I = 247$ [А] основные характеристики электрической машины управления по минимуму тока представлены в таблице 2.

4. Показатели качества при минимизации реактивной мощности

Условие передачи исполнительному механизму максимально возможной мощности, при ограничении напряжения и тока, определено путём преобразования уравнений (3) и (6) к следующему виду

$$\omega m = \frac{3}{2} i_{ogr} \cos \varphi \left(\sqrt{u_{ogr}^2 - r^2 i_{ogr}^2 \sin^2(\varphi)} - r i_{ogr} \cos(\varphi) \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\omega m)}{\partial \varphi} = 0; \quad \omega m = \frac{3}{2} (i_{ogr} u_{ogr} - r i_{ogr}^2) \quad (9)$$

$$i_d = -\frac{L i^2}{\Psi_0}; \quad i_q = \sqrt{i^2 - i_d^2} \quad (10)$$

При любом ограничении напряжения и тока, мощность, передаваемая исполнительному механизму (8) на электрической тяге, зависит от угла φ . При угле φ равном нулю, реактивная мощность Q также равна нулю, обеспечивая передачу максимальной мощности на передвижение транспортного средства при установленных ограничениях. Условия минимизации реактивной мощности могут быть реализованы при определённом формировании проекции вектора тока (10) продольной оси i_d . Задание тока поперечной оси i_q формируется в зависимости от требуемого электромагнитного момента M_{ref} . При ограничении тока потери в меди двигателя [18-19] одинаковы при любом законе управления. Потери в стали (5), силу снижения потокосцепления статора и одинаковом значении угловой скорости ротора, снижаются в три раза $P_c = 27$ [Вт] при минимизации реактивной мощности. На рисунке 3 представлена зависимость мощности, передаваемой исполнительному механизму $m\omega(i)$, электромагнитного момента $m(i)$ и скорости $\omega(i)$ от тока, при ограничении напряжения. С ростом нагрузки, максимально возможная скорость двигателя увеличивается.

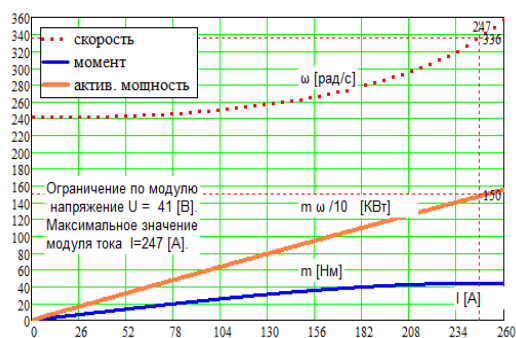


Рис. 3. Функция мощности, передаваемой исполнительному механизму $m\omega(i)$, электромагнитного момента $m(i)$ и скорости $\omega(i)$ от тока, при ограничении напряжения $U_{огр}$, подводимого к обмоткам двигателя.

Таблица 3
Основные характеристики электрической машины при минимизации реактивной мощности

P_n Вт	Q Вар	ω рад/с	M Нм	P_c Вт	ΔP Вт	$\cos(\varphi)$	η
15000	0	336	44	27	494	1	0.97

При ограничении модуля вектора напряжения $U = 41 [В]$ и тока на номинальном уровне $I = 247 [А]$ основные характеристики электрической машины при минимизации реактивной мощности представлены в таблице 3. Поскольку электромагнитный момент неявнополюсной синхронной машины линейно зависит от тока I_d , синтез управления осуществляется стандартными методами, отдавая предпочтение методу подчинённого регулирования. Проекция вектора тока (10), в соответствии с условиями минимизации реактивной мощности Q , следует поддерживать не только в статическом, но и в динамическом режиме. Поддержание условий минимизации реактивной мощности двигателя в динамических процессах позволит снизить величину напряжения, требуемого для форсирования управления, обеспечивая сокращение времени отклика системы на возмущение при ограничении напряжения, подводимого к обмоткам двигателя. Для этой цели быстродействие контура тока продольной оси i_d должно соответствовать быстродействию контура тока поперечной оси, настраивая систему на модалный оптимум. Сравнивая энергетические показатели работы двигателя при минимизации реактивной мощности и его работу при управлении по минимуму тока, можно отметить, при минимизации реактивной мощности и росте тока максимальный электромагнитный момент несколько меньше управления при минимизации тепловых потерь, но за счёт уменьшения модуля вектора

потокосцепления статора, величина угловой скорости двигателя существенно увеличивается.

Таким образом, при ограничении напряжения и тока на номинальном уровне в условиях минимизации реактивной мощности, электромагнитный момент снижается на 30 %, скорость двигателя, по отношению к управлению по минимуму тока, увеличивается на 79 %, при этом исполнительному механизму для совершения механической работы может быть передано на 25 % больше мощности. Такое улучшение энергетических характеристик позволит увеличить расстояние перемещения механизма на одной зарядке аккумулятора. В этих условиях проекция вектора потокосцепления статора вдоль продольной оси не превышает половины величины потока постоянных магнитов. Выполнение этих условий не приведёт к размагничиванию постоянных магнитов двигателя. За счёт увеличения скорости, при одинаковых потерях, коэффициент полезного действия в номинальном режиме работы увеличивается на 2 %.

Заключение

В работе анализируются два закона управления неявнополюсной синхронной машиной с постоянными магнитами тягового электропривода. Закон управления при минимизации потерь в меди МТРА (Maximum Torque per Ampere) и управление при минимизации реактивной мощности. Сравнение энергетических характеристик при ограничении напряжения и тока показывает, что при минимизации реактивной мощности электромагнитный момент в номинальном режиме работы снижается на 30%, но максимально возможная скорость, за счёт снижения модуля вектора потокосцепления статора, увеличивается на 79 %. Поэтому в условиях минимизации реактивной мощности исполнительному механизму может быть передано на 25 % больше мощности. Косвенно, этот показатель характеризует расстояние, на которое можно переместить исполнительный механизм на одной зарядке аккумулятора.

Энергетическая эффективность тягового электропривода, за счёт увеличения скорости, увеличивается на 2 %. В работе отмечается, что выполнение условий минимизации реактивной мощности не только в статических, но и в динамических режимах, позволит уменьшить величину напряжения, необходимого для форсирования управляющих сигналов. Поэтому при ограничении напряжения, подводимого к обмоткам двигателя, время реакции системы управления синхронной машины с постоянными магнитами на возмущение может быть уменьшено относительно управления током по поперечной оси. Косвенно, улучшение энергетических характеристик двигателя позволит увеличить расстояние перемещения механизма на одной зарядке аккумулятора.

Литература

1. Вейнгер А. М., Гусев А. С., Тартаковский Ю. С. О возможности управляемого электропривода с синхронным двигателем // Электричество. – 1971. – № 9. – С. 60 – 64.
2. Дартау В. А. Теоретические основы построения частотных электроприводов с векторным управлением. Автоматизированный электропривод / под ред. Ю. П. Павлова, В. В. Рудакова. – М.: Энергия, 1980. – 184 с.

3. Krishna Shenaie Shakti Corporation, Naples, FL, USA. High-Density Power Conversion and Wide-Bandgap Semiconductor Power Electronics Switching Devices. Proceedings of the IEEE. Volume: 107, no. 12, pp. 2308 – 2326, Dec. 2019, doi: 10.1109 / JPROC. 2019. 2948554.
4. Смирнов А. Ю. Особенности проектирования и анализа высокоскоростных синхронных машин с постоянными магнитами на роторе // Электротехника и энергетика: Известия Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеевой – 2013 – № 4 (101). – с. 231-235.
5. Рудаков В. В. Электроприводы с оптимизацией режимов работы / В. В. Рудаков Геннадий Сергеевич Зиновьев, член IEEE. Разработка набора показателей качества электроэнергии, 2018, 14– Международная научно – техническая конференция APEIE, Номер по каталогу IEEE: CFP18471–PRT, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия, стр. 44 – 47.
6. Козьярук, А. Е. Современная и перспективная алгоритмическая поддержка частотно–регулируемых электроприводов / А. Е. Козьярук, В. В. Рудаков. – Санкт–Петербург: Санкт–Петербургская электротехническая компания, 2004. – 127с.
7. Дмитрий А. Матвеев. Универсальная система управления полупроводниковым преобразователем электрической энергии на программируемой логике Device / 2018 14-я Международная научно-техническая конференция APEIE / Номер по каталогу IEEE: CFP18471 – PRT / Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия, стр. 94 – 101.
8. Филюшов Ю. П. Член IEEE. Формирование энергоэффективного управления высокоскоростным электроприводом переменного тока. Ю. П. Филюшов, Г. М. Симаков, В. Ю. Филюшов / IFOST 2016, Мехатроника и автоматизация, Каталог IEEE. 2016, Том 721, с. 324 – 329.
9. Ильинский Н.Ф., Сарбатов Р. С. Научно-технические аспекты повышения эффективности использования энергии в массовом электроприводе. Автоматизированный электропривод / Под общей редакцией Н. Ф. Ильинского, М. Г. Юнькова. – М.: Энергия
10. Патент: (RU) № 2,307,601, N 02 R 21 / 00. Устройство для векторного управления синхронным двигателем путём возбуждения от постоянных магнитов, Китонака Хидетоши (JP). Корпорация "Мицубиси Электрик" (JP). Заявка: № 2009115655/09, Опубликовано: 20.08.2018, Бюл. № 23
11. Филюшов Ю. П., Филюшов В. Ю. Управление синхронной машиной при минимизации тепловых потерь в условиях минимальной реактивной мощности . Электротехника, 2013, № 12, с. 57-63.
12. Симаков, Г. М. Управление асинхронным электроприводом без предварительного намагничивания. Г. М. Симаков, В. Ю. Филюшов, Ю. П. Филюшов. Международная конференция молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным устройствам. 2017. Том 742, стр. 525 – 528.
13. Blashke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage fur die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen, Siemens Zeitschrift, 1971, Bd, H.10. pp. 757 – 760.
14. Усынин Ю. С., Шишков С. П., Присосков С. П., Журавлев А. М. Параметрическая оптимизация приводов переменной частоты, Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергия, 2012, № 37, с.30–33
15. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. / Д. Уайт. – М.: Энергия, 1964. – 527 с. 17.
16. Филюшов Ю. П., Воевода А. А., Филюшов В. Ю. Линеаризация системы управления явнополюсной синхронной машиной при регулировании энергетических характеристик // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – № 5, с. 44 – 51.
17. Шубенко В.А. Оптимизация частотно–регулируемого асинхронного электропривода с минимальным током. В. А. Шубенко, Р. Т. Шрайнер, В. А. Мищенко. Электричество, 1970, № 9, с. 23 – 26.
18. Сарваров, А. С. Актуальные проблемы диагностики электропривода переменного тока / А. С. Сарваров, А. Р. Халикова // Электрические системы и комплексы. – 2012. – № 20. – с. 386 - 389.
19. Шрайнер Р., Медведь А., Поляков В., член IEEE. Оценка ресурсов энергосбережения многополюсного синхронного электропривода в непрерывных периодических режимах работы / Материалы IEEE / IX Международной конференции по системам электроприводов ICPDS' 2016 / Пермь, октябрь 2016 г., стр. 139 – 145.

References

1. Veynger A. M., Gusev A. S., Tartakovskiy, Y. S., On the possibility of controlled electric drive with synchronous motor. Electricity, 1971, № 9, pp. 60 – 64.
2. Dartau V. A. Theoretical bases of construction of frequency electric drives with vector control. Automated electric drive, edited by., Yu. P. Pavlov, V. V. Rudakov M.: Energy, 1980. 184 p.
3. Krishna Shenaie Shakti Corporation, Naples, FL, USA. High-Density Power Conversion and Wide-Bandgap Semiconductor Power Electronics Switching Devices. Proceedings of the IEEE. Volume: 107, no. 12, pp. 2308– 2326, Dec. 2019, doi:10.1109, JPROC. 2019. 2948554.
4. Smirnov A. Yu. Features of design and analysis of high – speed synchronous machines with permanent magnets on the rotor. Electrical engineering and power engineering: Proceedings of Nizhny Novgorod state technical University. R. E. Alekseeva , 2013 , № 4 (101), pp. 231–235.
5. Rudakov V. V. Electric drives with optimization of operating modes, V. V. Rudakov, L.: Nauka, 1970. 97 p. Gennady S. Zinoviev, Member, IEEE. Development of Set of Electric Energy Quality Factor, 2018 14-th International Scientific-Technical Conference APEIE – IEEE Catalog Number: CFP18471 - PRT. Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, pp. 44 - 47.
6. Kozyaruk, A. E. Modern and promising algorithmic support of frequency–controlled electric drives, A. E. Kozyaruk, V. V. Rudakov. St. Petersburg: St. Petersburg Electrotechnical Company, 2004. 127p.

7. Dmitri A. Matveyev. Universal Control System of a Semiconductor Electric Energy Converter on Programmable Logic Device, 2018 14th International Scientific-Technical Conference APEIE, IEEE Catalog Number: CFP18471 - PRT, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, pp. 94 – 101.
8. Filushov, Yu. P. Member, IEEE. The formation of energy – efficient control of a high – speed AC electric drive, Yu. P. Filushov, G. M. Simakov, V. Yu. Filushov / IFOST 2016, Mechatronics and Automation, IEEE Catalog. 2016, Vol. 721, pp. 324 – 329
9. Ilyinsky N. F. Sarbatov R. S. Scientific and technical aspects of increasing the efficiency of energy use in a mass electric drive. Automated electric drive, Under the general editorship of N. F. Ilyinsky, M. G. Yunkov. M.: Energoatomizdat, 1986. – 448 p.
10. Patent: (RU) No. 2,307,601, N 02 R 21 00. A device for vector control of a synchronous motor by excitation from permanent magnets, Kitonaka Hidetoshi (JP). Mitsubishi Electric Corporation (JP). Application: No. 2009115655/09, Published: 20.08.2018 Byul. No. 23
11. Filyushov Yu. P., Filyushov V. Yu. Control of a synchronous machine while minimizing heat losses under conditions of minimum reactive power, Electrical engineering. 2013, No. 12. pp. 57-63.
12. Simakov, G. M. Asynchronous electric drive control without pre – magnetization . G. M. Simakov, V. Yu. Filushov, Yu. P. Filushov
13. Blashke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage fur die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen ,Siemens Zeitschrift, 1971, Bd, N.10. pp. 757 – 760.
14. Syynin, Y. S., Shishkov , Suckers, S. P., and Zhuravlev, A. M., Parametric optimization of variable frequency drives//Bulletin of the South Ural state University. Series: Energy.2012.№ 37. pp.30 – 33.
15. White D., Woodson G. Electromechanical energy conversion. D. White. M.: Energiya, 1964.–527p.
16. Filyushov Yu. P., Voevoda A. A., Filyushov V. Yu. Linearization of the control system of a single-pole synchronous machine when regulating energy characteristics. Mining equipment and electromechanics. 2019. No. 5, pp. 44-51.
17. Shubenko, V.A. Optimization of a frequency-controlled asynchronous electric drive with a minimum current, V. A. Shubenko, R. T. Schreiner, V.A. Mishchenko , Electricity 1970. No. 9. pp. 23-26.
18. Sarvarov, A. S. Actual problems of diagnostics of an alternating current electric drive , A. S. Sarvarov, A. R. Khalikova , Electrical systems and complexes.- 2012. No. 20. pp. 386 - 389.
19. Shreiner R., Medvede A. Polyakov V., Member, IEEE. Estimation of Energy Saving Resources of Salient Pole Synchronous Electric Drive in Continuous Operating Periodic Duties, Proceedings of the IEEE . IX International Conference on Power Drives Systems ICPDS' 2016, Perm, October, 2016, pp. 139 – 145.

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

Юрий Петрович Филушов, доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования и автоматики, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630005, Новосибирск ул. Щетинкина 33, e-mail: filushov@mail.ru

Yuri P. Filyushov, Dr. Sci. (Eng), Professor of the Department of Electrical Equipment and Automation, Siberian State University of Water Transport, 630005, Novosibirsk, 33 Shchetinkina str, Russian Federation, e-mail: filushov@mail.ru

Борис Владимирович Палагушкин, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630005, Новосибирск ул. Щетинкина 33, e-mail: 9134889132@mail.ru

Boris V. Palagushkin, Dr. Sci. (Eng), Professor, Vice-Rector for Scientific Work, Siberian State University of Water Transport, 33 Shchetinkina str, Novosibirsk, 630005, Russian Federation, e-mail: 9134889132@mail.ru

Марина Анатольевна Павлова, доцент кафедры электрооборудования и автоматики, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630005, Новосибирск, ул. Щетинкина 33, e-mail: info@nsawt.ru

Marina A. Pavlova, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment and Automation, Siberian State University of Water Transport, 33 Shchetinkina str., Novosibirsk, 630005, Russian Federation, e-mail: info@nsawt.r

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.12.2022.
 Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 05.01.2023.
 Принята к публикации/accepted for publication 25.01.2023.

Научная статья

УДК 62-50.531.3

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.023>

Принцип конкретизации абстрактных знаний автономным интеллектуальным роботом в процессе планирования поведения в условиях неопределенности

Мелехин В.Б.¹ pashka1602@rambler.ru, Хачумов М.В.^{2,3} khmike@inbox.ru

¹Дагестанский государственный технический университет, ²Институт программных систем им. А.К.Айламазяна РАН, ³Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН

Аннотация. В статье предложен один из принципов организации когнитивных инструментов понятийного мышления предназначенных для планирования целенаправленной деятельности автономным интеллектуальным роботом в априори неопределенных условиях проблемной среды. В основу данного принципа закладываются инструментальные средства, обеспечивающие роботу возможность конкретизации абстрактных знаний, заданных безотносительно к конкретной предметной области, с целью адаптации к текущим условиям функционирования, используя систему наводящих вопросов и ответов для уточнения сведений требуемых для вывода решений.

В соответствии с двумя способами определения цели поведения (декларативной и процедурной формой ее представления), разработаны схемы наводящих вопросов, получая ответ на которые автономный интеллектуальный робот с учетом текущих условий функционирования конкретизирует заданные в общем виде типовые конструкции модели представления знаний и на этой основе автоматически генерирует план целенаправленной деятельности. Для получения ответов на формулируемые по заданной схеме вопросы разработаны процедуры обработки знаний и вывода решений, учитывающие текущие возможности как самого интеллектуального робота, так и поступающую из проблемной среды информацию. Предложенные процедуры вывода решений позволяют автономному интеллектуальному роботу адаптироваться к текущим условиям функционирования и на этой основе организовать свою целенаправленную деятельность, связанную с выполнением сложных заданий в условиях неопределенности.

Ключевые слова: автономный интеллектуальный робот, априори неопределенная проблемная среда, схема наводящих вопросов и ответов, нечеткая семантическая сеть, навыки поведения, инструментальные средства вывода решений.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-10056, <https://rscf.ru/project/21-71-10056/>

Для цитирования: Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Принцип конкретизации абстрактных знаний автономным интеллектуальным роботом в процессе планирования поведения в условиях неопределенности. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 181—190. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.023

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.023>

The principle of concretization of abstract knowledge by an autonomous intelligent robot in the process of planning behavior under uncertainty

Vladimir B. Melekhin¹ pashka1602@rambler.ru, Mikhail V. Khachumov^{2,3} khmike@inbox.ru

¹Dagestan State Technical University, Russian Federation, ²Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences, Russian Federation, ³Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Russian Federation

Abstract. The article proposes one of the principles of organizing cognitive tools of conceptual thinking intended for planning purposeful activities by an autonomous intelligent robot in a priori undescribed conditions of a problematic environment. This principle is based on tools that provide the robot with the ability to concretize abstract knowledge, given regardless of a specific subject area, in order to adapt to the current operating conditions, using a system of leading questions and answers to clarify the information required for the conclusion of solutions. In accordance with two methods for determining the goal of behavior (declarative and procedural form of its representation), schemes of leading questions have been developed, receiving an answer to which an autonomous intelligent robot, taking into account the current operating conditions, concretizes the standard constructions of the knowledge representation model given in a general form and, on this basis, automatically generates purposeful action plan. To obtain answers to questions formulated according to a given scheme, procedures for processing knowledge and deriving solutions have been developed that take into account the current capabilities of both the intelligent robot itself and the information coming from the problem environment. The proposed decision inference procedures allow an autonomous intelligent robot to adapt to the current operating conditions and, on this basis, organize its purposeful activities related to the performance of complex tasks under conditions of uncertainty.

Keywords: autonomous intelligent robot, a priori undescribed problem environment, scheme of leading questions and answers, fuzzy semantic network, behavioral skills, decision-making tools.

Financial Support: The study was financially supported by the Russian Science Foundation grant No. 21-71-10056, <https://rscf.ru/project/21-71-10056>

For citation: Melekhin V.B., Khachumov M.V. The principle of concretization of abstract knowledge by an autonomous intelligent robot in the process of planning behavior under uncertainty. Marine intelligent technologies. 2023. № 1 part 1, P. 181—190. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.023

Введение

Для наделения автономных интеллектуальных роботов (АИР) высокими интеллектуальными способностями [1] решатель задач таких роботов целесообразно создать на основе когнитивных инструментов наглядно-действенного, наглядно-образного и абстрактного мышления. Различное сочетание данных инструментальных средств позволяет АИР планировать целенаправленную деятельность обеспечивающую выполнение различных сложных заданий в априори неописанных условиях функционирования [2]. Однако в настоящее время проблемы, связанные с разработкой когнитивных инструментов абстрактного мышления интеллектуальных систем различного назначения практически остаются открытыми. В этой связи возникает объективная необходимость в разработке принципов построения различных по назначению когнитивных инструментов абстрактного мышления АИР, опираясь на формализацию данной формы мышления человека [3].

К одному из подходов организации инструментальных средств абстрактного мышления АИР следует отнести обработку заданных в абстрактном виде знаний, не привязанных к конкретной предметной области, а также инструментальных средств их конкретизации и использования в процессе автоматического

<Основной вопрос (1) \Rightarrow ответ(1); уточняющий вопрос (2) \Rightarrow ответ (2);...; уточняющий вопрос (j) \Rightarrow ответ (j);...; уточняющий вопрос (n) \Rightarrow ответ (n), полностью снимающий неопределенность в совокупности с предыдущими ответами, присутствующую в сформулированных вопросах и заданной модели представления знаний>.

Применение таких цепочек наводящих вопросов как ориентиров, определяющих стратегию поиска решений в процессе планирования целенаправленной деятельности, автономный интеллектуальный робот, уточняя заданные ему в общем виде знания, становится способным сгенерировать план предстоящей деятельности в виде упорядоченной последовательности навыков поведения [5], отражающих определенные допустимые изменения текущих условий функционирования. Для этого, если в интеллектуальном решателе задач, опираясь на обработку информации, отражающей текущие условия ПС и функциональные возможности АИР, формулируется положительный ответ на текущий вопрос, то робот приближается к решению текущей задачи поведения на основе имеющихся у него сведений и навыков поведения в конкретных условиях функционирования. При отрицательном ответе на текущий вопрос в интеллектуальном решателе задач АИР по заданной схеме генерируется следующий наводящий вопрос и т.д., до получения ответа, позволяющего снять неопределенность, присутствующую в текущих условиях функционирования, и использованной в процессе вывода решений цепочки вопросов.

планирования целенаправленной деятельности в априори неописанных проблемных средах (ПС). В этом случае для построения плана поведения, связанного с выполнением сформулированного АИР задания, в качестве ориентиров поиска решений целесообразно использовать заданные цепочки взаимосвязанных между собой наводящих вопросов, получение ответов на которые представляет собой имитацию вывода взаимосвязанных между собой суждений и умозаключений [4].

В общем случае ответы на сформулированные в интеллектуальном решателе задач АИР вопросы формируются на основе обработки следующих сведений:

- хранящихся в модели представления знаний;
- отражающих текущие условия проблемной среды;
- характеризующих имеющиеся у автономного интеллектуального робота возможности.

Для наделения АИР способностью конкретизации имеющихся в модели представления знаний абстрактных сведений о навыках решения различных подзадач поведения в текущих условиях функционирования, можно использовать следующую общую схему взаимосвязанных между собой наводящих вопросов и формулируемых на них ответов:

Отсюда, решение сложных задач на основе цепочек взаимосвязанных наводящих вопросов сводится к получению на них ответов, обеспечивающих уточнение знаний, которое снимает неопределенность, присутствующую в элементах модели их абстрактного представления, с целью адаптации АИР к текущим условиям функционирования.

Таким образом, в рассматриваемом случае абстрактное мышление АИР организуется на основе когнитивных инструментов обработки и конкретизации конструктивных элементов модели абстрактного представления знаний, обеспечивающих возможность планирования сложной, например, полифазной целенаправленной деятельности [6] при отсутствии у АИР формального описания закономерностей конкретной проблемной среды.

Все ответы на возникающие вопросы в процессе вывода решений генерируются в интеллектуальном решателе задач АИР до тех пор, пока не будет принято решение либо о том, что на основе имеющихся у автономного интеллектуального робота сведений и навыков, реализовать решаемую задачу поведения в текущих условиях функционирования не представляется возможным.

Либо отвечая на вопросы, снимая возникшую на данном шаге неопределенность, АИР параллельно генерирует план решения стоящей перед ним задачи поведения в текущих условиях ПС.

При этом вывод решения каждой такой задачи поведения, по аналогии с ситуационным управлением [7], организуется на основе сравнения между собой:

- признаков объектов, находящихся в ПС и входящих в структуру типовых конструкций модели представления знаний;
- значений семантических отношений, которые выполняются между данными объектами в проблемной среде и в заданной цели поведения.

Постановка задачи

Рассмотрим АИР, оснащенный модулем технического зрения, интеллектуальным решателем задач, манипулятором и моторной подсистемой, позволяющей целенаправленно перемещаться в ПС. Техническое зрение обеспечивает АИР возможность распознавать известные объекты, находящиеся в ПС, а на основе системы датчиков получать и обрабатывать поступающую из проблемной среды дополнительную информацию, отражающую ее текущее состояние, а также возможности самого робота. Манипулятор используется АИР для манипулирования объектами ПС, для целенаправленного изменения текущих условий функционирования. В интеллектуальном решателе задач генерируется план предстоящей целенаправленной деятельности на основе имеющихся у АИР знаний с учетом поступающей из ПС информации.

Таким образом, АИР является интеллектуальной системой, способной активно взаимодействовать с ПС, обрабатывая множество различных действий

$B = \{b_i\}, i_1 = \overline{1, n_1}$, и распознавать известные ему

объекты $O = \{o_{i_2}(X_{i_2})\}, i_2 = \overline{1, n_2}$, которые могут присутствовать в проблемной среде в процессе целенаправленной деятельности, где X_{i_2} – множество признаков, характеризующих объект проблемной среды $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$.

Часть действий $b_i(X_{i_1}) \in B^*, B^* \subset B$ связана с проведением АИР инструментальной деятельности, где X_{i_1} – множество характеристик, которыми должны обладать различные объекты ПС $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$ для того, чтобы автономный интеллектуальный робот мог их использовать в качестве инструмента для успешной отработки действий $b_i(X_{i_1}) \in B^*$.

Фактические возможности АИР в текущий момент времени можно охарактеризовать множеством параметров $P_T = \{p_i\}, i_3 = \overline{1, n_3}$, оценки которых определяются исходя из имеющихся у робота потенциальных возможностей с учетом возмущающих факторов ПС, снижающих данные

возможности. К основным таким параметрам, характеризующим текущие возможности АИР, следует отнести:

- допустимые l_{i_2} расстояния между роботом и объектами ПС $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$, которые требуется переместить в процессе целенаправленной деятельности, определяющиеся исходя из габаритных размеров и веса данных объектов, а также рабочей зоны манипулятора АИР. Например, АИР может захватить и перенести произвольный объект ПС если он расположен на определенном от робота расстоянии и имеет определенные габаритные размеры и вес. Поменять же местоположение в ПС других объектов, не удовлетворяющих данным требованиям, робот способен, только толкая их впереди себя или потянув за собой;

- возможную скорость v^* движения АИР по различным участкам ПС, зависящую от вида и текущего состояния грунта на этих участках. Например, при наличии грязи после дождя максимально возможная скорость перемещения робота снижается;

- размеры L зоны прямой видимости в текущих условиях функционирования, зависящие от времени суток (освещенности) и имеющихся в ПС определенных возмущающих факторов, а также разрешающей способности технического зрения АИР. Например, наличие тумана в ПС снижает зону прямой видимости интеллектуального робота.

Цель поведения задается АИР одним из следующих способов:

- в процедурной форме представления в виде сформулированной последовательности подзадач, которые требуется решить в процессе целенаправленной деятельности для достижения заданной цели;

- в обобщенной декларативной форме представления в виде нечеткой семантической сети S_{Π} [8], отображающей в общем виде ситуацию ПС, в которую АИР требуется преобразовать ее текущую ситуацию для достижения заданной цели.

В свою очередь, ПС можно охарактеризовать множеством допустимых ситуаций

$S = \{s_j\}, j_1 = \overline{1, m_1}$, структура которых включает находящиеся в зоне прямой видимости неизвестные

$o_{j_2} \in O^*, O^* = \{o_{j_2}\}, j_2 = \overline{1, m_2}$ и известные $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$ АИР объекты ПС, а также количественные оценки $r_{j_3}^*$ отношений

$R = \{r_{j_3}\}, j_3 = \overline{1, m_3}$, сложившихся между данными объектами в текущих условиях функционирования. Кроме того, в нестабильных проблемных средах могут происходить различные события

$Q = \{q_k(X_{k_1})\}, k_1 = \overline{1, z}$, приводящие к независимым от действия АИР изменениям в ПС и появлению связанных с ними возмущающих

факторов, где X_{k_1} – характеристики события $q_{k_1}(X_{k_1}) \in Q$ происходящего в ПС. В этой связи, формальное описание текущего состояния нестабильной ПС целесообразно дополнить наблюдаемыми в ней событиями $q_{k_1}(X_{k_1}) \in Q$ и связанными с ними возмущающими факторами, ограничивающими потенциальные возможности АИР.

В общем случае модель знаний АИР включает структурированное описание различных конструкций их представления, имеющих следующее назначение.

1. Семантические сети $S_{j_1} \in S^*$, предназначенные для формального описания текущих ситуаций ПС $s_{j_1} \in S$.

2. Нечеткие семантические сети $S^{**} = \{S_{i_3}\}, i_3 = \overline{1, n_3}$, определяющие в обобщенной форме представления отдельные фрагменты допустимых ситуаций ПС $s_{j_1} \in S$, характеризующие условия, которые должны выполняться в текущих условиях функционирования АИР для успешной отработки роботом как отдельных действий $b_{i_1} \in B$ и $b_{i_1}(X_{i_1}) \in B^*$, так и упорядоченных их цепочек, образующих навыки поведения интеллектуального робота, связанные с решением различных подзадач целенаправленной деятельности.

3. Нечеткие семантические сети S_{Π} , описывающие заданную в абстрактной форме представления цель поведения АИР.

4. Нечетко заданные типовые конструкции, определяющие влияние возмущающих факторов ПС на потенциальные функциональные возможности АИР.

5. Структурированное представление навыков $D = \{d_{i_4}\}, i_4 = \overline{1, n_4}$, обеспечивающих АИР решение различных типовых подзадач поведения $d_{i_4}^* \in D^*$ в сложившихся условиях ПС.

6. Элементы представления знаний в виде фрейм-действий и фрейм-отношений [9, 10], обеспечивающих АИР возможность планирования поведения, связанного с внесением в текущее состояние ПС отдельных целенаправленных изменений путем:

- манипулирования находящимися в проблемной среде объектами;
- перехода в новое текущее местоположение.

7. Конструкции, отражающие условия успешного выполнения и результаты отработки инструментальных действий $b_{i_1}(X_{i_1}) \in B^*$.

Таким образом, опираясь на структурированное абстрактное описание перечисленных выше конструкций представления знаний и допустимых ситуаций ПС, требуется построить:

- типовые схемы, служащие для автоматической генерации взаимосвязанных между собой наводящих

вопросов, ответы на которые позволяют АИР оценить свои возможности и построить план целенаправленной деятельности в текущих условиях функционирования;

– инструментальные средства, обеспечивающие вывод ответов на сформулированные вопросы на основе обработки знаний и поступающей из проблемной среды информации, определяющей текущие условия предстоящей деятельности и функциональные возможности АИР.

Следует отметить, что задачи автоматического построения текущих ситуаций ПС $s_{j_1} \in S$ и распознавания находящихся в среде объектов $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$ являются самостоятельными проблемами и в настоящей статье не рассматриваются.

Структура и содержание элементов представления знаний АИР

В общем случае различные конструкции представления знаний, отражающие текущие условия ПС, функциональные возможности и навыки АИР, имеют следующие структуру и содержание.

1. Семантические сети $S_{j_1} \in S^*$, характеризующие текущие ситуации ПС $s_{j_1} \in S$, формально определяются помеченными графами $G_{j_1} = (V_{j_1}, E_{j_1})$, где $V_{j_1} = \{v_{j_4}\} j_4 = \overline{1, m_4}$ и $E_{j_1} = \{e_{j_5}\}, j_5 = \overline{1, m_5}$ – соответственно множества вершин и ребер. Вершины $v_{j_4} \in V$ в семантических сетях S_{j_1} помечаются находящимися в ПС неизвестными роботу объектами $o_{j_2} \in O^*$, если они являются препятствиями, и описанием текущего состояния известных АИР объектов $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$. Ребра $e_{j_5} \in E_{j_1}$ в сетях S_{j_1} определяются количественными оценками $r_{j_3}^*$ отношений $r_{j_3} \in R$, которые выполняются в проблемной среде между находящимися в ней объектами.

2. Нечеткие семантические сети, характеризующие различные фрагменты

$S^{**} = \{S_{j_6}\}, j_6 = \overline{1, m_6}$ допустимых ситуаций ПС $s_{j_1} \in S$, описывающие условия, которые должны выполняться в текущих условиях функционирования АИР для успешной отработки как отдельных действий $b_{i_1} \in B$ и $b_{i_1}(X_{i_1}) \in B^*$, так и навыков, связанных с решением различных подзадач целенаправленной деятельности. Формально нечеткие семантические сети $S_{j_6} \in S^{**}$ представляют собой помеченные графы

$G_{j_6} = (V_{j_6}, E_{j_6})$, где $V_{j_6} = \{v_{j_7}\} j_7 = \overline{1, m_7}$ и

$E_{j_6} = \{e_{j_8}\}$, $j_8 = \overline{1, m_8}$ – соответственно множества вершин и ребер. Вершины $v_{j_7} \in V_{j_6}$ в нечетких семантических сетях $S_{j_6} \in S^{**}$ помечаются слотами $y_{j_7}(Y_{j_7})$, где Y_{j_7} – множество характеристик (признаков), которыми должны обладать произвольные объекты $o_{j_2}(X_{j_2}) \in O^*$, находящиеся в ПС, чтобы было допустимым заполнение слота $y_{j_7}(Y_{j_7})$ данными объектами в процессе вывода решений АИР. Ребра $e_{j_8} \in E_{j_6}$ в сети S_{j_6} определяются следующими двойками $\langle T_{j_9}, (r_{j_9}^*, r_{j_9+1}^*) \rangle$, $j_9 = \overline{1, 5}$, где T_{j_9} – терм лингвистической переменной, одноименной с отношением $r_{j_3} \in R$, которое определяет характер взаимодействия смежных объектов в ПС; $r_{j_9}^*$ и $r_{j_9+1}^*$ – соответственно нижняя и верхняя граничные оценки подинтервала численных значений терма T_{j_9} на шкале искомой лингвистической переменной. Данный подинтервал определяет допустимые количественные значения $r_{j_3}^*$ отношения $r_{j_3} \in R$, которые должны выполняться в ПС исходя из принятых в нечеткой семантической сети S_{j_6} условий, необходимых для успешной деятельности АИР.

3. Вершины и ребра в нечетких семантических сетях S_{II} , описывающих цель поведения АИР, определяются аналогичным образом, как и в нечетких семантических сетях $S_{j_6} \in S^{**}$. Только в этом случае двойки $\langle T_{j_9}, (r_{j_9}^*, r_{j_9+1}^*) \rangle$, $j_9 = \overline{1, 5}$,

Если в ПС идет или прошел “очень слабый” дождь, то допустимая скорость перемещения v^ в текущих условиях функционирования может быть “высокая”.*

Таким образом, модель представления знаний для каждого события $q_{k_1}(X_{k_1}) \in Q$, приводящего к появлению в ПС возмущающего фактора, влияющего с различной интенсивностью на деятельность АИР, будет определяться пятью продукциями, имеющими приведенную выше структуру.

5. Навыки $d_{i_4} \in D$, которыми обладает АИР для решения соответствующих им подзадач целенаправленной деятельности $d_{i_4}^* \in D^*$, имеют следующий формат описания: <Идентификатор подзадачи $d_{i_4}^* \in D^*$; требования к текущим функциональным возможностям АИР P_T ; вход $S_{j_6}^{i_4}(1)$; план решения подзадачи $d_{i_4}^* \in D^*$; выход

которыми помечены ребра в сетях S_{II} , характеризуют интервальные значения отношений $r_{j_3} \in R$, которые должны выполняться в ПС в результате достижения АИР заданной цели поведения.

4. Значения $p_{i_3}^*$ основных параметров $P_T = \{p_{i_3}\}$, $i_3 = \overline{1, 5}$, определяющих возможности, которыми АИР может воспользоваться в текущей ситуации ПС $S_{k_2} \in S^{/*}$ для успешной деятельности, задаются в нечеткой форме представления следующими парами $\langle \mu(p_{i_3}^*), T_{i_4}^{i_3} \rangle$, где $\mu(p_{i_3}^*)$ – степень принадлежности количественной оценки $p_{i_3}^*$ параметра p_{i_3} нечеткому множеству, которое соответствует подинтервалу численных значений терма $T_{i_4}^{i_3}$ одноименной с этим параметром лингвистической переменной [11]. Например, допустимая скорость движения АИР v^* в текущих условиях ПС может определяться следующими термами одноименной лингвистической переменной: “очень низкая”, “низкая”, “средняя”, “высокая” и “очень высокая”.

Аналогичным образом представляются также и характеристики различных происходящих в ПС событий $q_{k_1}(X_{k_1}) \in Q$. Например, при наличии в ПС дождя, он может быть “очень слабым”, “слабым”, “средним”, “сильным” и “очень сильным”.

Это позволяет сформировать модель представления знаний, обеспечивающую АИР возможность определять допустимые текущие значения $p_{i_3}^*$ своих параметров $p_{i_3} \in P_T$ на основе продукций имеющих, например, следующее содержание:

$S_{j_6}^{i_4}(2) \rangle$, где “идентификатор подзадачи $d_{i_4}^* \in D^*$ ” соответствует ее функциональному назначению, например, “Переместиться в ПС в требуемое местоположение” и т.п.; P_T – параметры, определяющие текущие возможности АИР, необходимые для эффективного решения подзадачи $d_{i_4}^* \in D^*$ в сложившихся условиях ПС; “вход $S_{j_6}^{i_4}(1)$ ” – нечеткая семантическая сеть, описывающая условия, которые должны выполняться в ПС для успешной отработки АИР упорядоченной последовательности действий $b_i \in B$ и $b_i(X_{i_1}) \in B^*$, образующей “план решения подзадачи $d_{i_4}^* \in D^*$ ”; “выход $S_{j_6}^{i_4}(2)$ ” – нечеткая семантическая сеть, характеризующая изменения,

происходящие в проблемной среде в результате обработки АИР действий, входящих в структуру плана решения подзадачи $d_{i_4}^* \in D^*$.

6. Фреймы действий в общем случае имеют следующую структуру представления:

<“Идентификатор действия $b_{i_1} \in B$ ”; “вход $S_{j_6}^{i_1}(1)$ ”; “выход $S_{j_6}^{i_1}(2)$ ”>,

где “идентификатор” – определяет назначение действия $b_{i_1} \in B$ и включает упорядоченную

<“Идентификатор отношения $r_{j_3} \in R$ ”; “действие $b_{i_1}^+$, обработка которого приводит к росту в ПС текущего значения $r_{j_3}^$ этого отношения”; “действие $b_{i_1}^-$, в результате обработки которого АИР происходит уменьшение текущего значения $r_{j_3}^*$ отношения $r_{j_3} \in R$ ”>*.

7. Следует отметить, что в модели представления знаний АИР инструментальные действия $b_{i_1}(X_{i_1}) \in B^*$ имеют такой же формат описания, как и обычные действия $b_{i_1} \in B$. Только для их результативной обработки в текущих условиях функционирования АИР в ПС должен присутствовать объект $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$, для которого выполняется условие $X_{i_1} \subseteq X_{i_2}$.

<Какие имеющиеся из навыков поведения $d_{i_4} \in D$ позволяют наилучшим образом решить текущую подзадачу $d_{i_4}^ \in D^*$ в сложившихся условиях ПС? Выполняются или нет в ПС условия $S_{j_6}^{i_4}(1)$ необходимые для результативного выполнения выбранных навыков поведения $d_{i_4} \in D$? Получится или нет внести корректировки в текущие условия ПС, обеспечивающие возможность результативной обработки навыков $d_{i_4} \in D$ для решения текущей подзадачи $d_{i_4}^* \in D^*$?>*

Для ответа на первый вопрос АИР, используя модель представления знаний, с учетом наблюдаемых в ПС событий $q_{k_1}(X_{k_1}) \in Q$ определяет текущие значения своих параметров P_T . Затем из модели представления знаний, по содержанию текущей решаемой подзадачи $d_{i_4}^* \in D^*$ и значений параметров P_T , выбираются навыки поведения $d_{i_4} \in D$, обеспечивающие решение этой подзадачи. Если такие навыки отсутствуют, то формулируется отрицательный ответ и план поведения АИР, связанный с решением $d_{i_4}^* \in D^*$ подзадачи, строится на основе фреймов действий и отношений, используя формальное описание текущей ситуации ПС в виде семантической сети [10]. В противном случае, в интеллектуальном решателе задач АИР формулируется следующий вопрос.

Для ответа на второй вопрос проверяется следующее условие “является или нет нечеткая семантическая сеть $S_{j_6}^{i_4}(1)$, определяющая “вход”

систему команд, которые подаются на исполнительные механизмы манипулятора для его обработки; “вход $S_{j_6}^{i_4}(1)$ ” и “выход $S_{j_6}^{i_4}(2)$ ” – нечеткие семантические сети, соответственно характеризующие в общем виде условия, которые должны выполняться в среде для успешной обработки действия $b_{i_1} \in B$ и изменения, происходящие в ПС в результате выполнения АИР этого действия.

В свою очередь, фреймы отношений имеют следующий формат описания:

Инструментальные средства вывода решений

Рассмотрим случай, когда цель поведения задается АИР в процедурной форме представления в виде упорядоченной последовательности подзадач $d_{i_4}^* \in D^*$, определяющих характер предстоящей деятельности. В этом случае для выбора и конкретизации типовых элементов модели представления знаний в процессе планирования поведения на каждом предстоящем шаге целенаправленной деятельности, используется следующая схема наводящих вопросов:

выбранных навыков поведения $d_{i_4} \in D$, нечетко вложенной [12] в семантическую сеть $S_{j_1} \in S^*$ соответствующую текущей ситуации ПС $s_{j_1} \in S$: если данное условие выполняется, то для решения текущей подзадачи полученного задания, АИР использует выбранные навыки поведения $d_{i_4} \in D$ и осуществляется переход на следующий шаг планирования целенаправленной деятельности, реализуемый по вышеописанному принципу. На данном шаге планирования определяется возможность применения имеющихся у робота навыков для решения следующей подзадачи поведения и т.д., до построения всего плана предстоящей деятельности; в противном случае, в интеллектуальном решателе задач АИР формулируется следующий, третий вопрос.

С целью ответа на третий вопрос проверяется условие “все слоты $y_{j_7}(Y_{j_7})$ в нечеткой семантической сети $S_{j_6}^{i_4}(1)$ могут быть помечены находящимися в ПС объектами”: если данное

условие выполняется, то для внесения изменений в текущее состояние проблемной среды, необходимых для результативной отработки навыков $d_{i_4} \in D$ формируется соответствующий подплан поведения на основе фреймов действий и отношений, а также формального описания текущей ситуации ПС; в противном случае, принимается решение о том, что отработка навыков поведения $d_{i_4} \in D$ невозможна

<Достижима или нет заданная цель поведения S_{Π} в текущих условиях ПС, определяемых семантической сетью $S_{j_1} \in S^$? Имеются или нет навыки $d_{i_4} \in D$, позволяющие выполнить преобразование текущей ситуации ПС $s_{j_1} \in S$ в заданную целевую ситуацию, определяемую нечеткой семантической сетью S_{Π} ? Возможно, или нет решить текущую подзадачу поведения $d_{i_4}^* \in D^*$ путем построения плана предстоящей деятельности на основе фрейм-действий и фрейм-отношений?>*

Для ответа на первый вопрос строится фрагмент $S_{j_1}^*$ текущей ситуации ПС s_{j_1} , определяющей участок среды, на котором АИР предстоит решать сформулированную ему задачу. С этой целью все слоты в нечеткой семантической сети S_{Π} помечаются находящимися в среде объектами $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$, удовлетворяющими условиям $Y_{j_7} \subseteq X_{i_2}$. В свою очередь, ребра в сети S_{Π} определяются количественными оценками $r_{j_3}^*$ отношений $r_{j_3} \in R$, которые сложились в ПС между данными объектами. Таким образом, формируется семантическая сеть $S_{j_1}^*$, определяющая текущие условия ПС, в рамках которых АИР предстоит решать поставленную ему задачу поведения. При этом если в формальном описании $S_{j_1}^*$ текущей подситуации ПС $S_{j_1}^*$ остались непомеченные слоты $y_{j_7}(Y_{j_7})$, то это говорит об отсутствии в проблемной среде объектов, необходимых АИР для достижения заданной цели поведения, т.е. поставленная роботу задача не может быть решена в текущих условиях функционирования.

В противном случае, в интеллектуальном решателе задач формулируется следующий вопрос. Для ответа на данный вопрос АИР, используя сведения, хранящиеся в модели представления знаний, требуется определить:

- параметры P_T с учетом наблюдаемых в ПС событий $q_{k_1}(X_{k_1}) \in Q$;
- все имеющиеся в модели представления знаний навыки поведения $d_{i_4} \in D^*$, $D^* \subset D$, удовлетворяющие требованиям параметров P_T .

Затем, используя выбранные навыки поведения $d_{i_4} \in D^*$ и инструментальные средства вывода, на основе ниже приведенных процедур строится план предстоящей целенаправленной деятельности АИР.

в текущей ситуации проблемной среды из-за отсутствия в ней необходимых для этого объектов.

Во втором случае, когда цель целенаправленной деятельности формулируется АИР в декларативной форме представления в виде нечеткой семантической сети S_{Π} , схема наводящих вопросов, определяющих стратегию вывода решения стоящей перед роботом задачи, имеет следующее содержание:

1. Принять в качестве ориентира поиска решения поставленной задачи нечеткую семантическую сеть $S_{\Pi}(h)$, соответствующую целевой ситуации ПС. Определить значение счетчика h отсчета номера решаемой в текущий момент времени подзадачи, равное единице.

2. В найденном подмножестве D^* выбрать навыки поведения $d_{i_4}^1(h)$, у которых нечеткая семантическая сеть $S_{j_6}^{1,i_4}(2)$, определяющая их “выход”, является нечетко вложенной в семантическую сеть $S_{\Pi}(h)$ [8], описывающую заданную цель на текущем шаге планирования поведения. Если такие навыки поведения отсутствуют, то активизировать следующий вопрос.

В противном случае проверяется следующее условие “семантическая сеть $S_{j_6}^{1,i_4}(1)$, соответствующая “входу” выбранных навыков поведения $d_{i_4}^1(h) \in D^*$, является нечетко вложенной в семантическую сеть $S_{j_1}^*$, определяющую исходные условия функционирования”: если данное условие выполняется, то перейти к п. 3; иначе, перейти к п. 4.

3. Текущая подзадача $d_{i_4}^*(h)$ решается на основе отработки навыков поведения $d_{i_4}^1(h) \in D^*$; перейти к п. 5.

4. Определить результативные навыки поведения $d_{i_4}^2(h)$, у которых семантическая сеть $S_{j_6}^{2,i_4}(2)$, определяющая их “выход”, является нечетко равной семантической сети [8], соответствующей “входу $S_{j_6}^{1,i_4}(1)$ ” навыков поведения $d_{i_4}^1(h) \in D^*$, выбранных на предыдущем шаге вывода решения текущей подзадачи. Если такие навыки поведения отсутствуют, то продолжить поиск решения текущей подзадачи на основе типовых элементов представления знаний в виде

фрейм-действий и фрейм-отношений. Для этого принять за подцель поведения внесение изменений в текущую ситуацию ПС, определяющихся нечеткой семантической сетью $S_{j_6}^{1,i_4}(1)$. После построения плана поведения, связанного с решением текущей подзадачи, перейти к п. 5.

В противном случае, если на текущем шаге планирования необходимые навыки поведения $d_{i_4}^2(h) \in D^*$ найдены, то проверить условие “семантическая сеть $S_{j_6}^{2,i_4}(1)$, соответствующая “входу” выбранных навыков поведения $d_{i_4}^2(h) \in D^*$, является нечетко вложенной в семантическую сеть $S_{j_1}^*$, определяющую исходные условия функционирования”: если данное условие выполняется, то перейти к п. 6; иначе, продолжить рост простой цепи навыков поведения, определяющей решение текущей подзадачи по вышеописанному принципу, пока не будут выявлены навыки поведения, у которых “вход $S_{j_6}^{2,i_4}(1)$ ” является нечетко вложенным в семантическую сеть $S_{j_1}^*$, определяющую исходные условия ПС”.

5. Вырезать из сети $S_{\Pi}(h)$ подсеть $S_{j_6}^{2,i_4}(2)$ за исключением ее вершин, являющихся смежными вершинам в оставшейся части семантической сети $S_{\Pi}(h)$, у которых инцидентные им ребра имеют различия с пометками структурно эквивалентных им ребер в сети $S_{j_1}^*$.

Проверить условие “в результате проведенной операции удаления подсети $S_{j_6}^{2,i_4}(2)$ из сети $S_{\Pi}(h)$ получена пустая подсеть $S_{\Pi}(h+1)$ ”: если условие выполняется, то принять решение о том, что план поведения АИР, связанный с преобразованием текущей подситуации ПС $S_{j_1}^*$ в целевую подситуацию, определяемую нечеткой семантической сетью S_{Π} , построен; в противном случае, принять за ориентир дальнейшего поиска решения поставленной задачи нечеткую семантическую сеть $S_{\Pi}(h)$; $h = h + 1$, перейти к п. 2.

Таким образом, найденное описанным выше способом решение поставленной АИР задачи поведения, определяющее план предстоящей целенаправленной деятельности робота в виде отдельных простых цепей, может состоять как из навыков поведения $d_{i_4} \in D^*$, так и включать фрагменты, построенные на основе фреймов действий и отношений. Реализация АИР построенного таким образом плана целенаправленной деятельности сводится к

обработке действий, входящих в структуры различных простых цепей, соответствующих плану решения различных подзадач поведения. При этом каждая простая цепь данного плана поведения может быть реализована АИР в произвольном порядке.

Следует отметить, что третий наводящий вопрос активизируется в процессе планирования целенаправленной деятельности АИР при отсутствии в модели представления знаний навыков поведения $d_{i_4} \in D$, позволяющих решить сформулированную АИР задачу. Отвечая на данный вопрос, робот строит план целенаправленной деятельности на основе фреймов действий и отношений. Данный план поведения представляет собой упорядоченную последовательность различных действий $b_i \in B$ и $b_i(X_i) \in B^*$, обработка которых позволяет АИР устранить все различия между текущей и целевой ситуациями проблемной среды.

Заключение

На основе полученных в статье результатов можно сформулировать следующие основные выводы.

1. Предложенные типовые элементы модели обобщенного представления знаний наделяют автономного интеллектуального робота гибкими функциональными возможностями, позволяющими решать сложные задачи в априори неопределенных средах на основе чередования в процессе планирования целенаправленной деятельности навыков поведения с фреймами действий и отношений, проводя конкретизацию содержания данных элементов с учетом текущих условий функционирования.

2. Рассмотренные схемы наводящих вопросов, определяющие стратегию поиска решений в процессе планирования поведения, позволяют АИР ориентироваться в модели представления знаний и на этой основе планировать целенаправленную деятельность в сложных проблемных средах с учетом собственных текущих функциональных возможностей, зависящих от различных возмущающих факторов проблемной среды.

3. Разработанные инструментальные средства получения ответов на наводящие вопросы по ходу вывода решений позволяют АИР обрабатывать знания заданные в обобщенной абстрактной форме представления, и на этой основе приспосабливаться к различным текущим условиям функционирования в процессе планирования целенаправленной деятельности в априори неопределенных условиях функционирования.

4. Дальнейшее развитие проведенного исследования связано с разработкой инструментальных средств модуля автоматической генерации вопросов в соответствии с заданной интеллектуальному роботу цели поведения и характера неопределенности, проявляющейся в текущих условиях проблемной среды.

Литература

1. Губайновский В.А. Искусственный интеллект и мозг человека. М., Наука, 2019, 254 с.
2. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Планирование поведения автономных интеллектуальных мобильных систем в условиях неопределенности: под ред. проф. В.М. Хачумова. СПб.: Политехника, 2022. 276 с.
3. Курпатов А.В. Мышление. Системное исследование. М.: Капитал, 2022. 672 с.
4. Финн В.К. Точная эпистемология и искусственный интеллект // Научно-техническая информация. Серия 2. Информационные процессы и системы. 2022. № 6. С.1–36.
5. Kober J., Peters J. Learning Motor Skills: From Algorithms to Robot Experiments. Cham: Springer, 2014. 201 p.
6. Melekhin V.B., Khachumov M.V. Planning polyphasic behavior of autonomous intelligent mobile system in uncertain environments // Informatsionno-Upravliaiushchie Sistemy. 2021. Vol. 113. No 4. Pp. 28–36.
7. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Ситуационный подход в задачах автоматизированного управления техническими объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19. № 9. С. 562–578.
8. Melekhin V.B., Khachumov M.V. Fuzzy semantic networks as an adaptive model of knowledge representation of autonomous intelligent systems // Scientific and Technical Information Processing. 2021. Vol. 48. No 5. Pp. 333–341.
9. Melekhin V.B., Khachumov M.V. Planning the Behavior of an Autonomous Flying Robot in a Space of Subtasks. Knowledge Representation Model // Scientific and Technical Information Processing. 2022. Vol. 49. No. 5. Pp. 1–8.
10. Melekhin V.B., Khachumov M.V. Planning the Behavior of an Autonomous Flying Robot in a Subtask Space. Inference Procedures // Scientific and Technical Information Processing. 2022. Vol. 49. No. 6. Pp. 1–9.
11. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение для принятия приближенных решений: пер. с англ. М.: Мир, 1976. 168 с.

References

1. Gubajnovskij V.A. Iskusstvennyj intellekt i mozg cheloveka [Artificial intelligence and the human brain]. M., izd. "Nauka", 2019, 254 s.
2. Melekhin V.B., Khachumov M.V. Planirovanie povedeniya avtonomnyh intellektual'nyh mobil'nyh sistem v usloviyah neopredelenosti [Planning the behavior of autonomous intelligent mobile systems under uncertainty]: pod red. prof. V.M. Khachumova, SPb., izd. «Politekhnika», 2022, 276 s.
3. Kurpatov A.V. Myshlenie. Sistemnoe issledovanie [Thinking. System research]. M., izd. «Kapital», 2022. 672 s.
4. Finn V.K. Tochnaya epistemologiya i iskusstvennyj intellekt [Accurate epistemology and artificial intelligence]. Nauchno-tehnicheskaya informaciya. Seriya 2. Informacionnye processy i sistemy, 2022, No 6, pp. 1–36.
5. Kober J., Peters J. Learning Motor Skills: From Algorithms to Robot Experiments. Cham, izd. «Springer», 2014, 201 s.
6. Melekhin V.B., Khachumov M.V. Planning polyphasic behavior of autonomous intelligent mobile system in uncertain environments. Informatsionno-Upravliaiushchie Sistemy, 2021, Vol. 113, No 4, pp. 28–36.
7. Filimonov A.B., Filimonov N.B. Situacionnyj podhod v zadachah avtomatizirovannogo upravleniya tekhnicheskimi ob"ektami []. Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie, 2018, Vol. 19. No 9, pp. 562–578.
8. Melekhin V.B., Khachumov M.V. Fuzzy semantic networks as an adaptive model of knowledge representation of autonomous intelligent systems. Scientific and Technical Information Processing, 2021, Vol. 48, No 5, pp. 333–341.
9. Melekhin V.B., Khachumov M.V. Planning the Behavior of an Autonomous Flying Robot in a Space of Subtasks. Knowledge Representation Model. Scientific and Technical Information Processing, 2022, Vol. 49, No. 5, pp. 1–8.
10. Melekhin V.B., Khachumov M.V. Planning the Behavior of an Autonomous Flying Robot in a Subtask Space. Inference Procedures. Scientific and Technical Information Processing, 2022, Vol. 49, No. 6, pp. 1–9.
11. Zade L. Ponyatie lingvisticheskoy peremennoj i ego primenenie dlya prinyatiya priblizhennyh reshenij [The concept of a linguistic variable and its application for making approximate decisions], per. s angl., M., izd. «Mir», 1976, 168 s.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Борисович Мелехин, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», Российская Федерация, 367015. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70; E-mail: pashka1602@rambler.ru

Vladimir B. Melekhin, Dr. Sci. (Eng), Professor, Department of Computer Software and Automated Systems, Dagestan State Technical University, 367015. Republic of Dagestan, Makhachkala, pr. Imam Shamilya, 70. E-mail: pashka1602@rambler.ru

Михаил Вячеславович Хачумов, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН, 152021, с. Веськово, Ярославская обл.; Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва (ФИЦ ИУ РАН), 117313. г. Москва, Россия, пр. 60-летия Октября, д.9; доцент кафедры информационных технологий, ФГБОУ ВО «Российский университет дружбы народов» Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6. E-mail: khmike@inbox.ru

Mikhail V. Khachumov, Ph.D. (Phys & Math), Senior Researcher, Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences, 152021, Veskovo, Russian Federation.; Federal Research Center "Computer Science and Control" of RAS, Russian Federation (FRC CSC RAS), 117313. pr. 60-letiya Oktyabrya, 9; Docent of the Information Technologies Department, Peoples' Friendship University of Russia, 117198, Moscow Miklukho-Maklaya str. 6,. E-mail: khmike@inbox.ru

Статья поступила в редакцию/ the article was submitted 25.01.2023.

Одобрена после рецензирования/ approved after reviewing 27.01.2023.

Принята к публикации/ accepted for publication 31.01.2023.

Научная статья

УДК: 629.564.3/629.58

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.024>

Совмещение систем позиционирования универсальных многоцелевых буксируемых геофизических комплексов с текущей позицией судна

М.Н. Лютикова¹ mnlyutikova@mail.ru, И.И. Бузенков¹ igor.buzenkov@mail.ru,Е.П. Халеева¹ bakay_e_p@mail.ru, С.О. Малахов¹ malaxov@gmail.com, О.В. Цепордей¹ toks812210@mail.ru¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В статье рассматривается позиционирование универсальных буксируемых комплексов (УМБК), буксируемых геофизическими судами. Навигационный комплекс судна позволяет решать задачи высокоточного позиционирования при движении судна вдоль линии заданного профиля. Под водой приём сигналов спутниковой навигации невозможен, поэтому передача сигналов коррекции часов навигационного комплекса гидролокаторов препятствий, многолучевых эхолотов, инерциальной навигационной системы может обеспечиваться по оптоволоконному кабелю, при этом необходимо точное вычисление позиции гаража-заглубителя (ГЗ), а также носителя нейтральной плавучести (ННП).

Проведено исследование определения координат буксируемой системы с борта буксирующего геофизического судна с использованием гидроакустических ответчиков при движении по линии заданного профиля приводит к расчётам по малым углам, с использованием метода триангуляции с равными сторонами позиций вершин треугольников, построенных по навигационным точкам. Применение инерциальных навигационных систем, удерживающих позицию над донной поверхностью, требует поправок к дрейфу характеристик системы, однако вычисление позиций вершин геометрии элементов буксируемых комплексов в привязке к навигационной системе геофизического судна должна определяться с приемлемой точностью.

Выполнены расчёты для скоростей 1, 2, 3 узла заглубляющей силы при разной длине буксирующей линии, позволяющие построить систему управления положением носителя нейтральной плавучести и гаража-заглубителя. Рассчитанные значения сил и моментов позволяют компенсировать их движителями, размещёнными в плане платформы носителя нейтральной плавучести, с желаемыми параметрами качества.

Цель исследования: выполнить корректировку инерциальной навигационной системы с совместным использованием технологической программы исследования донной поверхности с помощью информационного обмена по оптоволоконному кабелю с судовой навигационной системой по точной позиции элементов УМБК.

Ключевые слова: Универсальный многоцелевой буксируемый комплекс, носитель нейтральной плавучести, гараж-заглубитель, триангуляция, исследование шельфа, фреймтайм спутниковых измерений, фазовый центр антенны приёмника, часы реального времени

Для цитирования: Лютикова М.Н., Бузенков И.И., Халеева Е.П., Малахов С.О., Цепордей О.В. Совмещение систем позиционирования универсальных многоцелевых буксируемых геофизических комплексов с системами судна-носителя, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 191—199. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.024

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.024>

Combining of universal multi-purpose towed geophysical complexes positioning systems with the carrying ship's

Marina N. Lyutikova¹ mnlyutikova@mail.ru, Igor I. Buzenkov¹ igor.buzenkov@mail.ru,Elena P. Khaleeva¹ bakay_e_p@mail.ru, Sergey O. Malakhov¹ malaxov@gmail.com,Oksana V. Tsepordey¹ toks812210@mail.ru¹Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. In the paper deals with the positioning of universal multi-purpose towed complexes (UMTC) towed by geophysical vessels. The navigation complex of the vessel allows solving the problems of high-precision positioning when the vessel moves along the line of a given profile. Under water, reception of satellite navigation signals is impossible, therefore, the transmission of clock correction signals of the navigation complex of obstacle sonar, multibeam echo sounders, inertial navigation system can be provided via fiber optic cable, while it is necessary to accurately calculate the position of the deepening garage (DG), as well as the neutral buoyancy carrier (NBC).

Determining the coordinates of the towed system from the board of the towing geophysical vessel using hydroacoustic transponders when moving along the line of a given profile leads to calculations at small angles, while triangulation with equal sides of the positions of the vertices of triangles built on navigation points is considered optimal. The use of inertial navigation systems that hold the position above the bottom surface requires corrections for the drift of the system characteristics, however, the calculation of the positions of the geometry vertices of the elements of the towed complexes in relation to the navigation system of a geophysical vessel must be determined with acceptable accuracy. Calculations were made for speeds of 1, 2 and 3 nodes of the deepening force at different lengths of the towing line, which make it possible to construct a system for controlling the position of a carrier of neutral buoyancy and a deepening

garage. The calculated values of forces and moments make it possible to compensate for them with propulsors placed in terms of the carrier platform of neutral buoyancy, with the desired quality parameters.

The purpose of the study: to correct the inertial navigation system with the joint use of the technological program for the study of the bottom surface using information exchange via fiber-optic cable with the ship's navigation system according to the exact position of the UMBC elements.

Keywords: Universal multi-purpose towed complex, triangulation, shelf research, satellite measurements frametime, receiver antenna phase center, real time clock

For citation: Marina N. Lyutikova, Igor I. Buzenkov, Elena P. Khaleeva, Sergey O. Malakhov, Oksana V. Tsepordey, Combining of universal multi-purpose towed geophysical complexes positioning systems with the carrying ship's present position, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 191—199. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.024

Введение

Задачи применения подводных универсальных многоцелевых буксируемых комплексов составляют предметную область исследования шельфа, поисково-спасательных работ, привязанных, прежде всего к объектам находящихся на дне морей и океанов [1].

Технологии применения УМБК состоящего из гаража-заглубителя (ГЗ) и носителя нейтральной плавучести (ННП) буксируемых судном носителем рассматривается в сопровождающей системе координат (ССК) $O_a X_a Y_a Z_a$, в привязке к местной системе координат (МСК) $O_{i,j} X_i Z_i$, как показано на рисунке 1. Система координат судна носителя (СКН) OXYZ (рисунок 1) позволяет рассчитывать его позицию относительно геоцентрической (земной) системы координат (ЗСК) $O_{\xi,\eta,\zeta}$. Определение координат объекта находящегося на непосредственно на донной поверхности обеспечивается глобальным позиционированием [2]. Глобальное позиционирование требует использования инерциальной геоцентрической системы координат (ИСК) $OZ_{ECL} X_{ECL} Y_{ECL}$ ECI (Earth-centered inertial) которая в силу особенностей геоида не совпадает с геоцентрической системой координат.

По положению фазового центра антенны приёмника ГЛОНАСС/GPS измеряются псевдодальности, фазы и псевдоскорости на одной или двух несущих частотах спутникового сигнала [6].

1. Измерение псевдодальности ρ_{ma}^i , приёмника P_a по спутнику S_m в момент времени t^i определим в виде выражения:

$$\rho_{ma}^i = R_{ma}^i + c(\tau_m^i - \tau_a^i), \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме, R_{ma}^i – удаление между антеннами спутника S_m и приёмника P_a ; τ_m^i – поправка к часам спутника S_m , τ_a^i – поправка к часам приёмника P_a ; полученные в формируемом фреймтайме спутниковых измерений.

2. Фазовое измерение ϕ_{ma}^i приёмника P_a по спутнику S_m в момент времени t_a^i известно как [2]:

$$\phi_{ma}^i = f_m \cdot \left(\frac{R_{ma}^i}{c} + \tau_m^i - \tau_a^i \right) + N_{ma}, \quad (2)$$

где f_m – несущая частота спутникового сигнала S_m ; N_{ma} – целое число кратных преобразований фазы несущей частоты.

3. Измерение псевдоскорости $\dot{\rho}_{ma}^i$ приёмника P_a по спутнику S_m в формируемом фреймтайме выразим в виде [2]:

$$\dot{\rho}_{ma}^i = \dot{R}_{ma}^i + c k_a^i \quad (3)$$

$$k_a^i = (f_a^i - f_{*a}) / f_{*a}, \quad (4)$$

где c – скорость света, а параметры полученные в формируемом фреймтайме: \dot{R}_{ma}^i – скорость изменения расстояния между антеннами спутника S_m и приёмника P_a ; f_a^i – частота опорного генератора (ОГ) приёмника P_a ; f_{*a} – номинальная частота ОГ приёмника P_a ; k_a^i – относительное отклонение частоты ОГ приёмника P_a .

Величины R_{ma}^i и \dot{R}_{ma}^i , входящие в формулы (1-3) вычисляются в момент времени t^i по координатам и скоростям в ЗСК фазовых центров антенн спутника S_m и приёмника P_a .

Координаты r_a^i и скорости v_a^i фазового центра антенны P_a судна носителя выразим через ЗСК через параметры движения судна носителя в произвольный момент времени t^i :

$$r_a^i = r^i + Q^i r_a^\Delta; \quad (5)$$

$$v_a^i = v^i + \omega^i Q^i r_a^\Delta; \quad (6)$$

где r^i , v^i , Q^i , ω^i – значения параметров r , v , Q , ω движения судна носителя в момент времени t^i ; $r_a^\Delta = (X_a, Y_a, Z_a)$ – вектор координат антенны P_a в ТСК.

Полученные измерения ρ_{ma}^i , ϕ_{ma}^i , $\dot{\rho}_{ma}^i$ в момент t^i (формирования таймфрейма) выражаются параметрами движения судна носителя в тот же момент времени.

Навигационное оборудование УМБК

Эффективная работа системы подводной навигации (СПН) обеспечивается гидроакустической совместимостью комплекса оборудования, работающего совместно с навигационным комплексом судна-носителя. Наиболее эффективным способом обеспечения, которой является разнос частот излучения и полос частот излучения и приема сигналов, а также пространственное разнесение систем. Это практически исключает взаимное влияние на работу соседних каналов и трактов гидроакустических устройств, находящихся на гараже-заглубителе и непосредственно на самом аппарате [3-4].

Перечень гидроакустических приборов с характеристиками излучений, которые, согласно методикам, планируется к использованию при эксплуатации УМБК приведены в таблице 1.

Таблица 1

Требования к навигационному гидроакустическому оборудованию УМБК

Наименование прибора	Место установки	Диапазон частот излучения, кГц
Приемо-передающая антенна системы подводной навигации типа (СПН) «Posidonia» (УКБ): излучатель, приемник	СН	от 8 до 14 от 14 до 18
Маяк-ответчик системы подводной навигации	ГЗ	от 14 до 18
Маяк-ответчик системы аварийного автоотцепа	ННП	от 14 до 18
Эхолот РА-200-20	ГЗ, ННП	200
Многолучевой эхолот	ГЗ	200, 400
Локатор препятствий	ГЗ	170
Доплер-лаг (ДЛ)	ГЗ	300
Гидролокатор бокового обзора	ННП	75, 410
Акустический профилограф	ННП	от 2 до 16

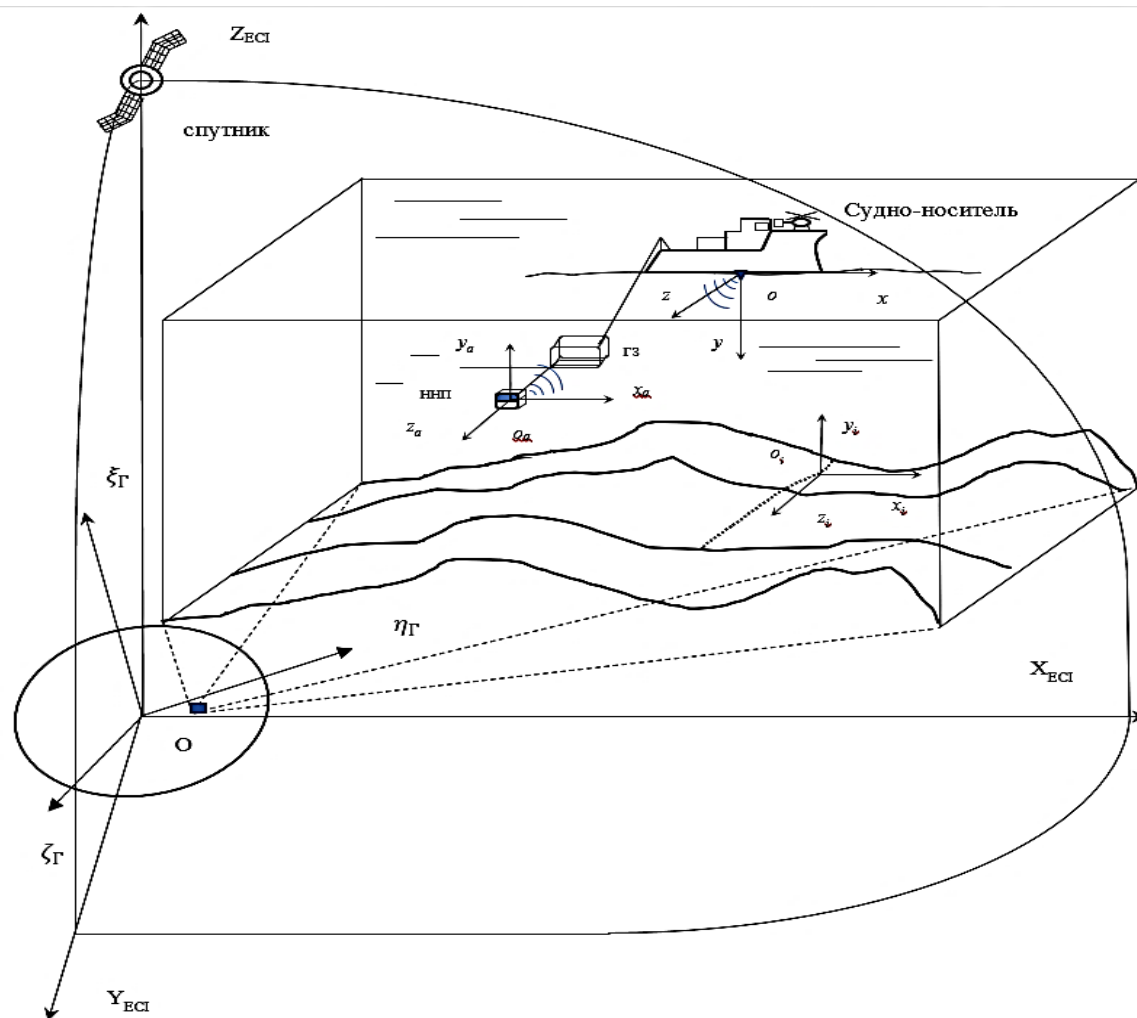


Рис. 1. Системы координат при автоматическом программном движении универсального многоцелевого подводного комплекса, ведомого судном носителем

Схема взаимного расположения секторов обзора антенн гидроакустического оборудования ГЗ в продольной и поперечной плоскостях изображена на рисунке 2.

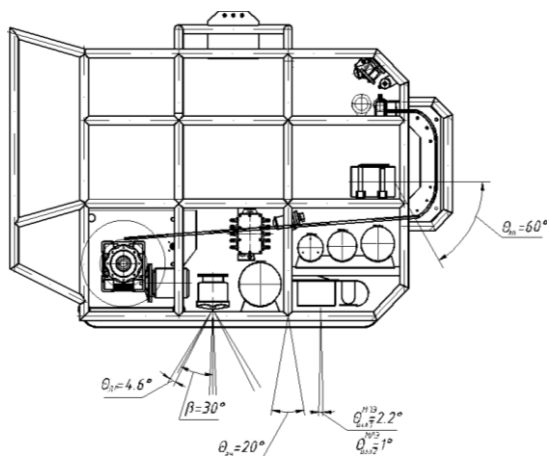


Рис. 2. Схема взаимного расположения секторов обзора антенн гидроакустического оборудования ГЗ в продольной плоскости

Гидроакустическая совместимость многолучевого эхолота (МЛЭ), локатора препятствий (ЛП), доплера и эхолота обеспечивается пространственным разнесением и ориентацией антенн этих систем, а также синхронизацией работы подсистем комплекса и временной селекцией эхосигналов.

Размещение гидроакустического навигационного оборудования на носителе нейтральной плавучести показано на рисунке 3.

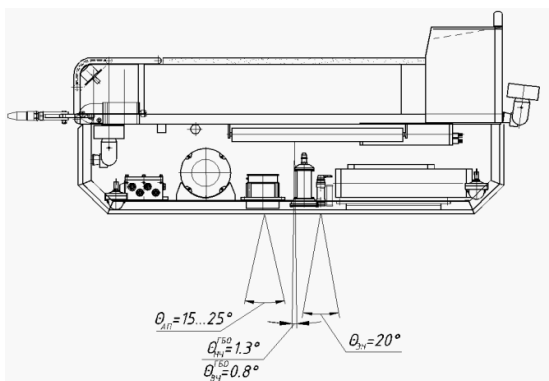


Рис. 3. Схема взаимного расположения секторов обзора антенн гидроакустического оборудования ННП в продольной и поперечной плоскости

Гидроакустическая совместимость гидролокатора бокового обзора (ГБО), акустического профилографа (АП), эхолота, установленных на носителе нейтральной плавучести (ННП), обеспечивается выбором центральных частот зондирующих сигналов, пространственным разнесением и ориентацией антенн навигационных систем, а также синхронизацией работы подсистем комплекса и временной селекцией эхосигналов [8-10].

ПЧ УМБК является двухзвенной и предполагает, что исследовательское оборудование располагается как на ННП, так и на ГЗ. Тяжелый ГЗ несет на себе часть гидроакустического оборудования (локатор препятствий, эхолот, МЛЭ), датчики положения (курс, крен, дифферент), давления, скорости звука, датчики

для системы сбора океанографической информации и экологического мониторинга морской среды, оборудование канала связи. На ННП установлены гидролокаторы бокового обзора низкой и высокой частоты, акустический профилограф, фототелевизионное оборудование, оборудование канала связи [11].

Определение позиции УМБК при буксировке

Контроль положения ГЗ в толще воды и относительно дна осуществляется по показаниям датчика давления и эхолота с точностью, заданной техническими характеристиками используемых приборов. Управление глубиной хода подводной части (ПЧ) УМБК возможно только изменением длины КТ за счет работы судовой лебедки спуск подъемного устройства (СПУ) или за счет изменения скорости движения судна. Эти способы являются основными, хотя не позволяют достаточно оперативно менять глубину буксировки ПЧ УМБК.

Расчет и анализ динамики УМБК при буксировке судном-носителем производится путем решения уравнений равновесия КТ для буксирной линии системы [5]. При этом КТ предполагается тяжелой, абсолютно гибкой, нерастяжимой нитью, находящейся в потоке жидкости. Со стороны жидкости на элемент нити действует гидродинамическая сила, которую можно представить в виде суммы двух составляющих: нормальной и касательной, которые вычисляются соответственно:

$$q_n = q_{n0} \sin^2 A; \tag{5}$$

$$q_k = q_{k0} \cos^2 A; \tag{6}$$

$$q_{n0} = c_n q d, \quad q_{k0} = c_k q d, \tag{7}$$

где c_n, c_k – безразмерные коэффициенты нормальной и касательной силы;

$q = \rho V_0^2 / 2$ – скоростной напор;

ρ – плотность жидкости;

V_0 – скорость потока;

d – диаметр троса;

A – угол атаки, который в случае, если вектор скорости V_0 горизонтален, является углом наклона троса.

Например, по разным наблюдениям для тросов круглого сечения при числах Re от 10^3 до $5 \cdot 10^5$ коэффициент c_n лежит в пределах от 1,1 до 1,4, отношение c_k/c_n составляет порядка от 0,01 до 0,05, поэтому при расчете допустимо не учитывать касательную составляющую гидродинамической силы [8].

С учетом сделанных предположений уравнения равновесия троса в потоке будут иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{dT}{ds} = G \sin A, \\ T \frac{dA}{ds} = G \cos A - q_{n0} |\sin A| \sin A, \\ \frac{dx}{ds} = \cos A, \\ \frac{dy}{ds} = \sin A, \end{cases} \tag{8}$$

где S – длина дуги, отсчитываемая от ходового конца, задающая положение точки на буксирной линии, точка $S=0$ соответствует точке крепления буксируемого тела, натяжение и угол наклона троса в этой точке известны и вычисляются как:

$$T_0 = [(\sum X_i)^2 + (\sum Y_i)^2]^{1/2}; \quad (9)$$

$$A_0 = -\arctg(\sum Y_i / \sum X_i), \quad (10)$$

где $\sum X_i$ - сумма проекций всех сил, действующих на буксируемое тело на ось x , направление которой совпадает с вектором скорости буксируемого тела;

$\sum Y_i$ - сумма проекций всех сил, действующих на тело, на ось y .

Точка $S=L$ соответствует корневому концу троса, в котором необходимо определить натяжение и его положение относительно ходового конца.

T – натяжение в данной точке троса;

G – погонный вес троса в воде;

A – угол наклона троса;

x, y – декартовы координаты точки троса; точке $S=0$ соответствует $x=0, y=0$.

Учитывая, известной длину кабель-троса, а также угол схода троса при буксировке можно определить координаты ГЗ и КТ, однако при определении позиции необходимо предусмотреть боковой снос для привязки координат УМБК к системе позиционирования судна-носителя.

Рассчитанные значения поправок должны корректировать часы реального времени УМБК и дрейф характеристик гиро-курсовертикали ННП относительно позиции судна-носителя. При такой реализации положение ННП можно корректировать относительно трансляции фототелевизионного комплекса и приборов гидроакустической навигации.

Использование построений треугольников относительно точки схода кабель-троса с судна носителя приводит к множеству узких треугольников, как показано на рисунке 4.

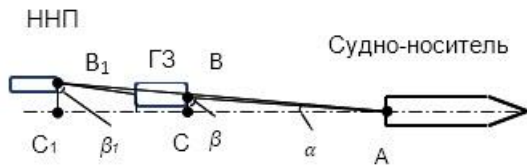


Рис. 4. Расчёт позиции УМБК (ГЗ и ННП) относительно судна-носителя

Оптимальной считается триангуляция, при которой длины сторон треугольников равны. В части оптимального построения вычислительных сеток наилучшей считается триангуляция Делоне [5]. В то же время триангуляция считается оптимальной в случае, если сумма построенных рёбер будет минимальной при том же наборе точек триангуляции.

Соответствие противоположных углов условию $\alpha + \beta \leq \pi$ эквивалентно условию $\sin(\alpha + \beta) \geq 0$ позволяет выполнить проверку условия Делоне для двух треугольников, как показано на рисунке 5.

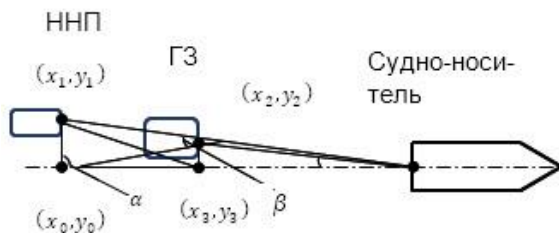


Рис. 5. Расчёт позиции УМБК (ГЗ и ННП) по условию Делоне по сумме противоположных углов

Можно записать

$$\sin\alpha \cdot \cos\beta + \cos\alpha \cdot \sin\beta \geq 0, \quad (11)$$

где значения синусов и косинусов вычисляются через скалярные произведения векторов [5] как:

$$\cos\alpha = \frac{(x_0-x_1)(x_0-x_3)+(y_0-y_1)(y_0-y_3)}{\sqrt{(x_0-x_1)^2+(y_0-y_1)^2}\sqrt{(x_0-x_3)^2+(y_0-y_3)^2}}; \quad (12)$$

$$\cos\beta = \frac{(x_2-x_3)(x_2-x_1)+(y_2-y_3)(y_2-y_1)}{\sqrt{(x_2-x_3)^2+(y_2-y_3)^2}\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2}}; \quad (13)$$

$$\sin\alpha = \frac{(x_0-x_1)(y_0-y_3)-(x_0-x_3)(y_0-y_1)}{\sqrt{(x_0-x_1)^2+(y_0-y_1)^2}\sqrt{(x_0-x_3)^2+(y_0-y_3)^2}}; \quad (14)$$

$$\sin\beta = \frac{(x_2-x_3)(y_2-y_1)-(x_2-x_1)(y_2-y_3)}{\sqrt{(x_2-x_3)^2+(y_2-y_3)^2}\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2}}. \quad (15)$$

С учётом подстановки (12-15) в (11) условие Делоне в виде скалярных произведений векторов запишем в виде

$$((x_0-x_1)(y_0-y_3)-(x_0-x_3)(y_0-y_1)) \cdot ((x_2-x_3)(x_2-x_1)+(y_2-y_3)(y_2-y_1)) + ((x_0-x_1)(x_0-x_3)+(y_0-y_1)(y_0-y_3)) \cdot ((x_2-x_3)(y_2-y_1)-(x_2-x_1)(y_2-y_3)) \geq 0. \quad (16)$$

Применение малоразрядных процессоров в блоках электроники вычисления позиций ГЗ и ННП триангуляцией по условию Делоне потребует 10 операций умножения и 13 операций сложения и вычитания.

Сопряжение инерциальной навигационной системы ГЗ и ННП с комплексом гидроакустического оборудования позволяет вычислять позиции относительно судна носителя. Передача корректуры инерциальной навигационной системы (ИНС) производится по оптоволоконному кабелю связывающего все три навигационные системы в единый комплекс управления.

Результаты

Размещение оборудования как на ННП, так и на ГЗ позволяет решить задачу позиционирования при условии, что ННП сможет маневрировать по глубине относительно ГЗ. Поэтому в составе ННП необходимо предусматриваются средства управления глубиной.

Для УМБК весом 15000 Н на скорости 6 уз (3 м/с) качественная фототелевизионная съёмка в условиях практической дальности видения невозможна, а опасность столкновения с грунтом при малой высоте высока, работы с комплексом будут производиться без заглупления ННП относительно ГЗ, и нет необходимости управлять отдельно высотным положением ННП. Управление глубиной погружения в данном случае будет проводиться с помощью лебедки СПУ.

При малых скоростях применение для маневрирования горизонтальных рулей нецелесообразно ввиду их малой эффективности при реально допустимых размерах - с учётом проведения операций состыковки ННП и ГЗ, совместного их подъёма на палубу в условиях морского волнения. Поэтому для создания заглупляющего усилия предусматривается использование реактивных движителей - гребных винтов.

Для определения количественной взаимосвязи между заглубляющей силой, скоростью буксировки, длиной КС и отстоянием ННП от ЗГ была проведена серия оценочных расчетов формы и натяжения КС в стационарном состоянии системы (статика гибкой нити) с учётом нормальной и касательной составляющих гидродинамического сопротивления.

Расчёты выполнены для диапазона скоростей от 1 до 3 уз (от 0,5 до 1,5 м/с) и двух длин КС – 75 м и 100 м - при его диаметре 16 мм и весе в воде 0,23 Н/м. Результаты расчётов представлены в таблице 2 и на рисунке 6, их анализ позволяет сделать следующие выводы:

- желаемое заглубление ННП – 30 м — достижимо для всех рассмотренных длин КС и скоростей буксировки при заглубляющем усилии 500 Н; при силе 400 Н и скорости 3 уз недостаточно 75 м КС (вертикальное отстояние составит около 25 м), поэтому необходимо вытравить 100 м;

- наиболее существенно влияет на маневренность ННП скорость буксировки; при скорости 1 уз заглубление ННП может достигать 70-90 м, а при скорости 3 уз — лишь 30-35 м;

- с увеличением длины КС вертикальная маневренность растёт; для длин 75 м и 100 м различие в перемещениях ННП при максимальных усилиях для скоростей 1, 2 и 3 уз составляет около 20 м, 10 м, и 7 м, соответственно, таблица 2.

С целью более полного использования тяги и минимизации вредного дифферента ННП при переходе на другой горизонт подруливающее устройство должно быть расположено как можно ближе к точке крепления КС в носовой оконечности

ННП. Для стабилизации дифферента во время переходных процессов целесообразно иметь также кормовое подруливающее устройство с меньшей тягой.

Для удобства размещения, компактности и унификации подруливающий комплекс выполнен из трёх одинаковых двигателей, два из которых расположены в носовой, а один — в кормовой оконечности. Например, двигатель – гребной винт фиксированного шага в направляющей насадке, выполненный в единой конструкции с электроприводом и системой управления, - SPE-75 фирмы Sub-Atlantic (швартовная тяга этого двигателя составляет 26 кгс в обе стороны).

С учётом того, что ННП для аварийного всплытия обладает положительной плавучестью 10-15 кгс, носовое подруливающее устройство, состоящее из двух двигателей, сможет создавать заглубляющую тягу около 40 кгс, кормовое — около 20 кгс.

Это позволит ННП:

- заглубляться относительно ГЗ на 30 и более метров при скоростях буксировки до 3 уз включительно, как показано на рисунке 6;
- при плавном изменении рельефа дна поддерживать постоянную альтитуду ННП без изменения глубины буксировки ГЗ;
- огибать единичные препятствия на грунте;
- стабилизировать дифферент на ходу;
- управлять высотным положением, дифферентом и креном при входе в ГЗ.

Таблица 2

Зависимость заглубления ННП относительно ГЗ от длины КС, заглубляющей силы и скорости буксировки

Длина кабеля связи $L_{КС}$, м		75					
Заглубляющая сила, Н		0	100	200	300	400	500
Заглубление ННП относительно ГЗ при скорости буксировки V_6 , м	$V_6 = 0,5$ м/с	6,6	42,1	56,6	63,9	67,7	70,0
	$V_6 = 1,0$ м/с	1,7	16,8	26,8	34,2	40,3	45,2
	$V_6 = 1,5$ м/с	0,8	8,5	14,7	19,9	24,2	28,1
Длина кабеля связи $L_{КС}$, м		100					
Заглубляющая сила, Н		0	100	200	300	400	500
Заглубление ННП относительно ГЗ при скорости буксировки V_6 , м	$V_6 = 0,5$ м/с	11,0	52,7	71,3	81,7	87,6	91,2
	$V_6 = 1,0$ м/с	3,0	21,6	33,4	42,2	49,6	55,8
	$V_6 = 1,5$ м/с	1,3	11,2	18,8	25,0	30,1	34,7

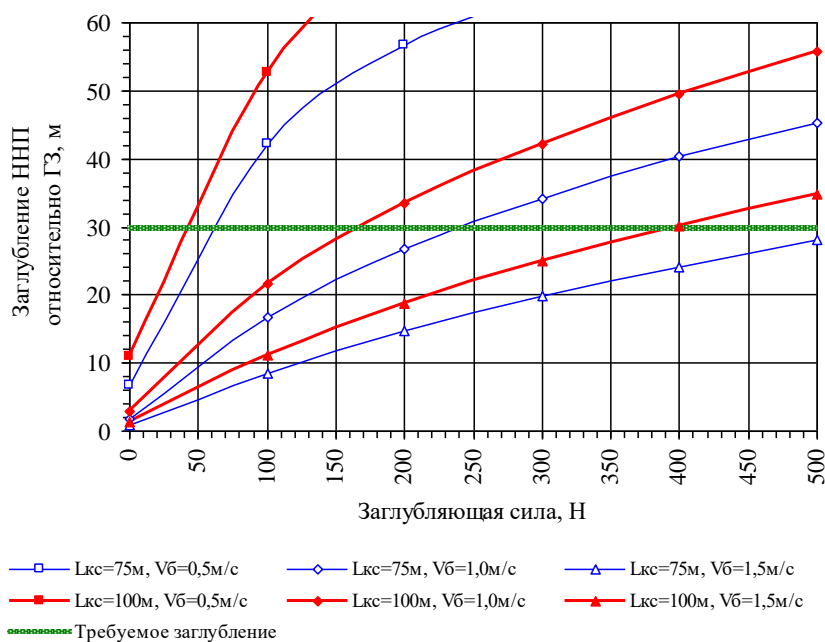


Рис. 6. Зависимость заглужения ННП относительно ГЗ от длины КС, заглужающей силы и скорости буксировки

Для эффективной работы подруливающего комплекса целесообразно предусмотреть возможность использования режима автоматического поддержания нулевого дифферента. Для разработки алгоритмов и программного обеспечения системы управления движением в автоматизированных режимах необходимо проведение:

- модельного эксперимента по уточнению гидродинамических коэффициентов ННП;
- численного моделирования процессов маневрирования ННП.

Выводы

Использование универсальное многоцелевой буксируемой системы с корректурой по позиции

судна носителя позволяет принципиально решить несколько задач:

- позиционирование УМБК относительно судна, а в привязке к координатам пересчет в местную систему координат;
- корректуру часов реального времени ГЗ и ННП; обеспечение МЛЭ комплекса временным поправкам спутника и соответственно счислению координат фазового центра антенны приёмника ГЛОНАСС/GPS и позиции обзора;
- создание адаптивной системы управления УМБК в привязке к точности счисления координат;
- компенсации ошибок позиции УМБК по параметрам триангуляции Делоне относительно судна-носителя.

Литература

1. Инзарцев, А. В., Киселев, Л. В., Костенко, В. В., Матвиенко, Ю. В., Павин, А. М., & Щербатюк, А. Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение, 2018.
2. Римский-Корсаков, Н. А. Технические средства для исследований дна акваторий гидролокационными методами. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, (10-2), 2017, с. 205-213.
3. Маркович, И., Душенин, Ю. В., Жирнов, В. С., Семеняк, П. П., & Ковальчук, Д. В. Локатор препятствий глубоководного носителя. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*, 116(3), 2011, с. 128-135.
4. Дханак, М. Р., и Ксирос, Н. И. (Ред.). *Справочник Спрингера по океанотехнике*. Springer, 2016.
5. Скворцов, А. В. *Триангуляция Делоне и её применение*. Алексей Владимирович Скворцов, 2002.
6. Бузенков, И. И., Тюфанова, А. А. Сравнительный интерференционный анализ конфигурации береговых радиолокационных станций при различных параметрах антенн, на примере района действия системы управления движением судов порта Новороссийск. *Морские интеллектуальные технологии*, 4(2), 2021, с.87-91.
7. Хекерт Е. В., Данцевич И. М., Лютикова М. Н., Халеева Е. П. Технология управления геофизическим судном для изучения Мирового океана. В серии конференций IOP: Earth and Environmental Science, 872, № 1, 2021, с. 012001.
8. Данцевич, И. М., Лютикова, М. Н. Результаты исследования управления системой «судно-заборное оборудование» в продольно-вертикальной плоскости. *Эксплуатация морского транспорта*, (3), 2021, с.76-81.
9. Грумондз, В. Т., Пильгунов, Р. В., & Виноградов, М. В. Динамика продольного движения подводного буксируемого аппарата в задаче мониторинга заданной области континентального шельфа. *Вестник*

Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Машиностроение», 6 (117), 2017, с.19-34.

10. Хекерт Е. В., Лютикова М. Н. Системы питания с нейтральной плавучестью для морских применений. Международная конференция по приложениям в электронике и вычислительных системах. Springer, Cham, 2023, с. 108-116.
11. Данцевич И. М., Уманская Л. А., Осьмуха С. А. Обратный инжиниринг прототипа электромагнитной гибридной двигательной установки для подводного аппарата. Международная конференция по приложениям в электронике и вычислительных системах. Springer, Cham, 2023, с. 58-69.

References

1. Inzartsev, A. V., Kiselev, L. V., Kostenko, V. V., Matvienko, Yu. V., Pavin, A. M., & Shcherbatyuk, A. F. Underwater robotic systems: systems, technology, application, 2018.
2. Rimsky-Korsakov, N. A. Technical means for researching the bottom of water areas using sonar methods. International Journal of Applied and Basic Research, (10-2), 2017, s. 205-213.
3. Markovich, I., Dushenin, Yu. V., Zhirnov, V. S., Semenyak, P. P., & Kovalchuk, D. V. Obstacle locator of a deep-water carrier. Proceedings of the Southern Federal University. Technical Sciences, 116(3), 2011, p. 128-135.
4. Dhanak, M. R., & Xiros, N. I. (Eds.). Springer's Handbook of Ocean Engineering. Springer, 2016.
5. Skvortsov, Alexei Vladimirovich Delaunay triangulation and its application. Alexey Vladimirovich Skvortsov, 2002.
6. Buzenkov, I. I., & Tyufanova, A. A. Comparative interference analysis of the configuration of coastal radar stations with different antenna parameters, on the example of the area of operation of the traffic control system of the port of Novorossiysk. Marine intelligent technologies, 4(2), 2021, pp.87-91.
7. Khekert, E. V., Dantsevich, I. M., Lyutikova, M. N., & Khaleeva, E. P. The technology of geophysical vessel control for the study of the world ocean. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 872, No. 1, 2021, p. 012001.
8. Dantsevich, I. M., & Lyutikova, M. N. Results of a study of the control of the "ship-outboard equipment" system in the longitudinal-vertical plane. Operation of maritime transport, (3), 2021, pp.76-81.
9. Grumonds, V. T., Pilgunov, R. V., & Vinogradov, M. V. Dynamics of the longitudinal motion of an underwater towed vehicle in the problem of monitoring a given area of the continental shelf. Bulletin of the Moscow State Technical University. NE Bauman. Series "Engineering", 6 (117), 2017, pp.19-34.
10. Khekert E.V. and M. N. Lyutikova M.N, Neutral buoyancy power supply systems for marine applications. International conference on applications in electronics and computing systems. Springer and Cham, 2023, p. 108-116.
11. Dantsevich I. M., Umanskaya L. A., Osmukha S. A. Reverse engineering of a prototype electromagnetic hybrid propulsion system for an underwater vehicle. International conference on applications in electronics and computing systems. Springer and Cham, 2023, p. 58-69.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Марина Николаевна Лютикова, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93., e-mail: mnlyutikova@mail.ru

Игорь Иванович Бузенков, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: igor.buzenkov@mail.ru

Елена Петровна Халеева, кандидат педагогических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93., e-mail: bakay_e_p@mail.ru

Marina N. Lyutikova, Ph.D.(Eng), Candidate of Technical Science, Department of Radioelectronics and Information Technologies, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: mnlyutikova@mail.ru

Igor I. Buzenkov, Ph.D. (Eng), associate professor, chief of «Radio engineering and Information Technologies» department at Admiral Ushakov Maritime State University, 93, Lenina avenue, Novorossiysk, Krasnodar region, 353924, Russian Federation, e-mail: igor.buzenkov@mail.ru

Elena P. Khaleeva, Ph.D.(Edu), Candidate of Sciences in Pedagogy, Department of Radioelectronics and Information Technologies, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: bakay_e_p@mail.ru

Сергей Олегович Малахов, кандидат экономических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93., e-mail: malaxov@gmail.com

Оксана Васильевна Цепордей, кандидат филологических наук, доцент кафедры иностранных языков, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93., e-mail: toks812210@mail.ru

Sergey O. Malakhov, Ph.D. (Econ), Candidate of Economical Science Department of Radioelectronics and Information Technologies, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: malaxov@gmail.com

Oksana V. Tsepordey, PhD (Phil), Department of Foreign Languages, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: toks812210@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 22.01.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 23.02.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 27.02.2023.

Научная статья

УДК 004.932

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.025>

Сравнительное исследование методов машинного обучения в задаче диагностики синхронных электродвигателей

В.А. Дюк¹ v_duke@mail.ru, В.Ю. Каминский¹ Kaminskyvy@yandex.ru

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. Экспериментально подтверждена эффективность современных инструментов машинного обучения для решения задачи бессенсорной диагностики синхронных электродвигателей. Многие из представленных методов продемонстрировали способность строить высокоточные модели в рамках сформулированной задачи. Важным в проведенном анализе являются преимущества примененной предобработки электрических сигналов с помощью метода эмпирической модовой декомпозиции. Эта предобработка во многом обусловила высокие показатели диагностических моделей. Сравнительное исследование различных инструментов машинного обучения показало, что наиболее точные результаты продемонстрировали методы: деревьев решений, случайного леса и ближайших соседей (точность диагностики более 99,78%). Вместе с тем, при использовании тех или иных методов следует учитывать, что несмотря на высокие результаты метода ближайших соседей для его реализации потребовалось почти в 100 раз больше временных ресурсов. С другой стороны, хотя методы деревьев решений и случайного леса построили модели примерно одинаковой точности, модель случайного леса оказалась на два порядка более ресурсоемкой при её формировании и на порядок более ресурсоемкой при её использовании.

Ключевые слова: машинное обучение, диагностика, модель, транспортные средства, декомпозиция, оптимизация маршрутов, отказ оборудования, случайная выборка.

Для цитирования: Дюк В.А., Каминский В.Ю. Сравнительное исследование методов машинного обучения в задаче диагностики синхронных электродвигателей, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 200—204. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.025

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.025>

Comparative study of machine learning methods in the task of diagnostics of synchronous electric motors

Vyacheslav A. Duke¹ v_duke@mail.ru, Valery Yu. Kaminsky¹ Kaminskyvy@yandex.ru

¹Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences

Abstract. The effectiveness of modern machine learning tools for solving the problem of sensorless diagnostics of synchronous electric motors has been experimentally confirmed. Many of the presented methods have demonstrated the ability to build high-precision models within the framework of the formulated task. Important in the analysis are the advantages of the applied preprocessing of electrical signals using the method of empirical mode decomposition. This preprocessing largely caused the high performance of diagnostic models. A comparative study of various machine learning tools showed that the most accurate results were demonstrated by the methods of: decision trees, random forest and nearest neighbors (diagnostic accuracy is more than 99.78%). At the same time, when using certain methods, it should be borne in mind that despite the high results of the nearest neighbors method, its implementation required almost 100 times more time resources. On the other hand, although the methods of decision trees and random forest built models with approximately the same accuracy, the random forest model turned out to be two orders of magnitude more resource-intensive when it was formed and more than an order of magnitude more resource-intensive when it was used.

Keywords: machine learning, diagnostics, model, vehicles, decomposition, route optimization, equipment failure, random sampling.

For citation: Vyacheslav A. Duke, Valery Yu. Kaminsky. Comparative study of machine learning methods in the task of diagnostics of synchronous electric motors, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 200—204. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.025

Введение

Машинное обучение (МО) является быстро развивающимся направлением искусственного интеллекта (ИИ), в котором компьютерные модели для принятия решений формируются, учатся и совершенствуются на основе опыта (накопленных или сгенерированных данных) без явного программирования [1]. На транспорте МО используется во многих областях. Это, например,

управление трафиком, оптимизация маршрутов, формирование графика доставки грузов, прогнозирование рентабельности и стоимости перевозки [2], разработка системы технического зрения [3], экологический мониторинг, прогноз загруженности на парковках, распознавание транспортных происшествий при помощи социальных сетей и др.

В морской транспортной отрасли МО может использоваться для оптимизации маршрутов судов с

учетом погодных условий и состояния моря; оптимизации операций в портах и терминалах, разработки автономных кораблей, которые могут перемещаться и выполнять задачи без вмешательства человека и пр. Методы МО применяют при прогнозировании отказов оборудования на судне в рамках планирования соответствующего технического обслуживания. Это позволяет снизить вероятность отказа оборудования и потребность в незапланированных простоях.

В статье рассмотрен практический пример применения различных методов машинного обучения для решения задачи бессенсорной диагностики неисправностей синхронного электродвигателя. Эти двигатели используются в электроэнергетической индустрии, в том числе на морском флоте, в качестве главных или вспомогательных генераторов постоянного тока.

Экспериментальные данные для построения диагностических моделей

Данные для построения диагностических моделей собирались на специально сконструированной экспериментальной установке [4]. В двигатель вносились различные механические повреждения – вмятины на шарикоподшипнике, перекосы вала и наклон оси. С учетом того, что применялись методы планирования эксперимента, всего рассматривалось 11 диагностических состояний, которые включали как повреждения по отдельности, так и их различные сочетания, а также состояние полностью исправного двигателя. Кроме того, измерения производились для 12 условий работы двигателя при различных скоростях, крутящих моментах и силах нагрузки.

Для характеристики состояния синхронного двигателя и подключенных к нему компонентов в описываемом исследовании использовались измерения двух фазных токов $I_1(t)$ и $I_2(t)$ в системе управления двигателем. Эти два тока $I_1(t)$ и $I_2(t)$ подвергались дальнейшему преобразованию по методу эмпирической модовой декомпозиции (ЭМД) [5], который, в частности, использовался нами в работе [6]. Кратко охарактеризуем этот метод.

Метод ЭМД отличается тем, что не использует априорный базис для разложения сигнала на составляющие и не требует осуществлять подбор внутренних параметров преобразования. Метод ЭМД основан на процедуре определения огибающей временного ряда (ВР) с последующим итеративным вычислением огибающей нового ВР, в качестве которого используется огибающая ВР, полученная на предыдущем этапе вычислений. Совокупность получаемых огибающих ВР принимается за собственный неортогональный базис. Манипуляции с ВР основаны на следующей аддитивной модели:

$$u(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t),$$

где временной ряд $u(t)$ представлен смесью определенного числа мод $c_i(t)$ и остаточного ряда $r_n(t)$. Каждая из этих мод принимается как базисная функция. Причем любой из них можно приписать некоторый реальный физический процесс, составляющий анализируемый ВР.

Получаемые моды необязательно ортогональны друг другу и отражают особенности исходного ВР на всех его локальных участках.

Метод ЭМД однозначным образом разбивает любой временной ряд $u(t)$ длины N на компоненты, называемые характеристическими модовыми функциями (Intrinsic Mode Functions – IMF). Получение мод достигается применением следующего базового алгоритма [7].

1. Поиск всех локальных точек экстремума для данного ВР – $u(t)$.

2. Вычисление с помощью сплайнов интерполяции двух огибающих кривых, проходящих, соответственно, через максимумы и минимумы анализируемого ряда. Обозначим верхнюю огибающую кривую (проходящую через максимумы) – U , нижнюю огибающую кривую (проходящую через минимумы) – L .

3. Вычисление среднего значения верхней и нижней огибающих

$$m = \frac{U + L}{2}.$$

4. Получение остатка вычитанием

$$r = u(t) - m.$$

5. Проверка критерия отсеивания (sifting process) и, при его невыполнении, применение процедур 1-4 для остатка ВР $u(t) = r$.

6. Полученный после отсеивания остаток r принимается за найденную компоненту $c_i(t) = r$, где i – номер компоненты или число пройденных циклов алгоритма EMD.

7. Вычитание из исходного ВР $u(t)$ найденной компоненты $c_i(t)$. Полученный остаток становится новым ВР для декомпозиции

$$u_i(t) = u(t) - c_i(t).$$

8. Проверка, является ли новый ВР монотонной функцией или удовлетворяет определенным заданным условиям. При положительных результатах проверки, декомпозиция завершается. Иначе – полученный ВР используется в качестве исходного, весь алгоритм декомпозиции повторяется уже для него. ВР, полученный на последнем шаге данного алгоритма, является остаточной компонентой $r_n(t)$.

В связи с тем, что сама процедура отсеивания остатка должна быть конечной, Хуанг предложил использовать для этого так называемый остановочный критерий (stoppage criterion). На практике многие исследователи ограничиваются более простым правилом остановки алгоритма. Как правило, десяти и даже менее итераций хватает для получения компонент со свойствами, близкими к характеристическим модовым функциям IMF.

В случае наших экспериментальных данных исследования показали, что для представления токов $I_1(t)$ и $I_2(t)$ достаточно первых трех модовых функций. Для дальнейшего анализа полученные модовые функции, а также их невязки разбивались на равные интервалы и в каждом интервале рассчитывались среднее значение, стандартное отклонение, асимметрия и эксцесс. Подробное описание этой процедуры приведено в [8].

В целом подобная предобработка привела к тому, что общее количество признаков, описывающих электрические сигналы, составило 48 плюс 1 – маркер состояния двигателя (всего 11 состояний – диагностических классов), а количество реализаций

сигналов (объектов) 58509 (по 5319 в каждом классе). Данные выложены в репозиторий UCI [9] на сайте [10].

Применяемые методы машинного обучения и сравнение результатов

Нами проведено исследование эффективности диагностики состояния синхронного двигателя с использованием популярных алгоритмов, входящих в состав свободного программного обеспечения для анализа данных и машинного обучения, университета Вайкато (Новая Зеландия) WEKA, распространяемого по лицензии GNU GPL [11]:

- Наивный байесовский классификатор (Наивный Байес);
- Многослойный перцептрон, использующий алгоритм обратного распространения ошибки (нейросеть);
- Метод ближайших соседей (БС);
- Деревья решений;
- Случайный лес;
- Машина опорных векторов (SMO).

При использовании указанных методов в основном использовались параметры, заданные по умолчанию в пакете WEKA. Вместе с тем, следует сделать некоторые уточнения. В качестве одной из возможных реализаций алгоритма машины опорных векторов применялся алгоритм SMO (Sequential Minimal Optimization), описанный в [12]. Количество скрытых слоев перцептрона по умолчанию задавалось по формуле $a = (\text{attribs} + \text{classes}) / 2$, где *attribs* – число признаков, *classes* – число классов. Также отметим, что при построении деревьев решений использовался алгоритм J48, который является аналогом на Java распространенного алгоритма C4.5 [13].

Случайная выборка данных, на которой обучались алгоритмы, составляла 66 % от общего объема данных. Соответственно, на тестовую выборку пришлось 33 % от общего объема данных. В табл. 1 приведены сводные результаты применения различных алгоритмов машинного обучения для построения моделей диагностики синхронного электродвигателя на тестовой выборке данных. В таблице указаны достигнутая точность диагностики, время на построение диагностической модели и время, затраченное на применении обученной модели. Строки в табл. 1 упорядочены по возрастанию точности модели.

Таблица 1

Сводные результаты применения алгоритмов машинного обучения

Алгоритм	Точность в %	Время на создание модели	Время на применение модели
Наивный Байес	74,47	0,52	1,27
SMO	88,28	29,7	0,13
Нейросеть	98,55	607,37	0,23
Случайный лес	99,78	43,17	0,94
Деревья решений	98,79	5,74	0,05
7-БС	98,79	0,01	120,03

Заключение

Экспериментально подтверждена эффективность современных инструментов машинного обучения для решения задачи бессенсорной диагностики синхронных электродвигателей. Многие из представленных методов продемонстрировали способность строить высокоточные модели в рамках решаемой задачи. Важным в проведенном анализе является полезность примененной предобработки электрических сигналов с помощью метода эмпирической модовой декомпозиции. Эта предобработка во многом обусловила достигнутые высокие показатели диагностических моделей. Сравнительное исследование различных инструментов машинного обучения показало, что наиболее точные результаты продемонстрировали методы деревьев решений, случайного леса и ближайших соседей (точность диагностики более 99,78 %). Особо нужно подчеркнуть тот, факт, что нейросетевой подход «проиграл» другим, менее изощренным методам и, как показано, не всегда является более продуктивным, о чем не раз говорилось в наших работах (например, [14]), и в работах некоторых зарубежных авторов [15]. Вместе с тем, здесь следует учитывать, что несмотря на высокие результаты метода ближайших соседей, входящего в тройку лидеров, на его реализацию потребовалось в 100 раз больше временных ресурсов. С другой стороны, хотя методы деревьев решений и случайного леса построили модели примерно одинаковой точности, модель случайного леса оказалась на два порядка более ресурсоемкой при её формировании и на порядок более ресурсоемкой при её использовании.

Литература

1. Дюк, В. А. Логические методы машинного обучения (инструментальные средства и практические примеры) / В. А. Дюк. – Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2020. – 248 с.
2. Власов, А. А. Робастное прогнозирование интенсивности движения транспортных потоков // International Journal of Advanced Studies. – 2022. – Т. 12. – № 2. – С. 7-20.
3. Дюк В. А., Малыгин И. Г., Прицкер В. И. Распознавание транспортных средств по силуэтам -трехкаскадный метод машинного обучения в системах технического зрения // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – № 2-1(56). – С. 162-167.
4. Lessmeier, C.; Piantsoop Mbo'o, C.; Coenen, I.; Zimmer, D.; Hameyer, K.: Untersuchung von Bauteilschäden elektrischer Antriebss-tränge im Belastungsprüfstand mittels Statorstromanalyse. In: AKI- DA 2012 - 9. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung. (Nienhaus, K., Hg.). Stolberg: Zillekens. 2012.
5. Huang N. E., Shen Z., Long S. R. et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proc. R. SOC. London, Ser. A. 1998. no. 454. P. 903–995.

6. Исследование метода эмпирической модовой декомпозиции в задаче анализа сигналов акустической эмиссии / В. А. Дюк, В. И. Комашинский, И. Г. Малыгин [и др.] // Информатика и космос. – 2018. – № 4. – С. 50-55.
7. Сафиуллин Т.Н. Разработка методики анализа временных рядов с помощью преобразования Хуанга-Гильберта, Канд.дисс, Новосибирск – 2015.
8. Bator, M., Dicks, A., Mönks, U., Lohweg, V. Feature Extraction and Reduction Applied to Sensorless Drive Diagnosis. In: 22. Workshop Computational Intelligence (Hoffmann, F.; Hüllermeier, E., Hg.), Bd. 45 von Schriftenreihe des Instituts für Angewandte Informatik - Automatisierungstechnik am Karlsruher Institut für Technologie, S. 163-178. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing. ISBN 978-3-86644-917-6. 2012.
9. Dua D., Graff C. UCI Machine Learning Repository [<http://archive.ics.uci.edu/ml>]. Irvine, CA: University of California, School of Information and Computer Science. – 2019.
10. <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Dataset+for+Sensorless+Drive+Diagnosis#>.
11. Eibe Frank, Mark A. Hall, and Ian H. Witten. The WEKA Workbench. Online Appendix for «Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques», Morgan Kaufmann, Fourth Edition, 2016.
12. Platt C. Sequential Minimal Optimization: A Fast Algorithm for Training Support Vector Machines, In: Advances in Kernel Methods — Support Vector Learning, ed. by B. Schölkopf and C. J. C. Burges and A. J. Smola, Cambridge, MA, MIT Press. 1999, pp. 185–208.
13. Куинлан, Дж. Р. С4.5: Программы для машинного обучения. Издательство Морган Кауфманн, 1993.
14. Дюк, В. А. Экспериментальное исследование реакции алгоритмов машинного обучения на ошибки разметки данных / В. А. Дюк // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 2022. – Т. 2022, № 3. – С. 59-72.
15. Grüner T., Böllhoff F., Meisetschläger R., Vydrenko A., Bator M., Dicks A., Theissler A. Evaluation of machine learning for sensorless detection and classification of faults in electromechanical drive systems. Procedia Comput. Sci., 176 (2020), pp. 1586-1595.

References

1. Diuk V. A. Logicheskie metody mashinnogo obucheniia instrumentalnye sredstva i prakticheskie primery [Logical methods of machine learning (tools and practical examples)] Sankt-Peterburg. Izdatel'sko-poligraficheskaiia assotsiatsiia vysshikh uchebnykh zavedenii. 2020. 248 p.
2. Vlasov A. A. Robastnoe prognozirovanie intensivnosti dvizheniia transportnykh potokov [Robust forecasting of traffic flow intensity]. International Journal of Advanced Studies. 2022. V 12. №2. pp. 7-20.
3. Diuk V. A., Malygin I. G., Pritsker V. I. Raspoznavanie transportnykh sredstv po siluetam -trekhkaskadnyi metod mashinnogo obucheniia v sistemakh tekhnicheskogo zreniia [Recognition of vehicles by silhouettes is a three-stage method of machine learning in vision systems]. Morskie intellektualnye tekhnologii. 2022. №2-1 (56) pp. 162-167.
4. Lessmeier, C.; Piantop Mbo'o, C.; Coenen, I.; Zimmer, D.; Hameyer, K.: Untersuchung von Bauteilschäden elektrischer Antriebss-tränge im Belastungsprüfstand mittels Statorstromanalyse. In: AKI- DA 2012 - 9. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung, (Nienhaus, K., Hg.). Stolberg: Zillekens. 2012.
5. Huang N. E., Shen Z., Long S. R. et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proc. R. SOC. London, Ser. A. 1998. no. 454. pp. 903–995.
6. Issledovanie metoda empiricheskoi modovoi dekompozitsii v zadache analiza signalov akusticheskoi emissii [Investigation of the empirical mode decomposition method in the problem of acoustic emission signal analysis]. V. A. Diuk, V. I. Komashinskii, I. G. Malygin [i dr]. Informatsiia i kosmos. 2018. №4. pp. 50-55/
7. Safiullin T N Razrabotka metodiki analiza vremennykh riadov s pomoshchiu preobrazovaniia KHuanga-Gilberta [Development of a methodology for analyzing time series using the Huang-Hilbert transform]. Kand. diss. Novosibirsk. 2015.
8. Bator, M., Dicks, A., Mönks, U., Lohweg, V. Feature Extraction and Reduction Applied to Sensorless Drive Diagnosis. In: 22. Workshop Computational Intelligence (Hoffmann, F.; Hüllermeier, E., Hg.), Bd. 45 von Schriftenreihe des Instituts für Angewandte Informatik - Automatisierungstechnik am Karlsruher Institut für Technologie, S. 163-178. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing. ISBN 978-3-86644-917-6. 2012.
9. Dua D., Graff C. UCI Machine Learning Repository [<http://archive.ics.uci.edu/ml>]. Irvine, CA: University of California, School of Information and Computer Science. – 2019.
10. <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Dataset+for+Sensorless+Drive+Diagnosis#>.
11. Eibe Frank, Mark A. Hall, and Ian H. Witten. The WEKA Workbench. Online Appendix for «Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques», Morgan Kaufmann, Fourth Edition, 2016.
12. Platt C. Sequential Minimal Optimization: A Fast Algorithm for Training Support Vector Machines, In: Advances in Kernel Methods — Support Vector Learning, ed. by B. Schölkopf and C. J. C. Burges and A. J. Smola, Cambridge, MA, MIT Press. 1999, pp. 185–208.
13. Kuinlan Dzh R C4 5 Programmy dlia mashinnogo obucheniia [Machine Learning software]. Izdatelstvo Morgan Kaufmann. 1993.
14. Diuk V. A. Eksperimentalnoe issledovanie reaktcii algoritmov mashinnogo obucheniia na oshibki razmetki dannykh [Experimental study of the reaction of machine learning algorithms to data markup errors]. Differentsialnye uravneniia i protsessy upravleniia. 2022. V. 2022. №3. pp. 59-72.
15. Grüner T., Böllhoff F., Meisetschläger R., Vydrenko A., Bator M., Dicks A., Theissler A. Evaluation of machine learning for sensorless detection and classification of faults in electromechanical drive systems. Procedia Comput. Sci., 176 (2020), pp. 1586-1595.

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

Вячеслав Анатольевич Дюк, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: v_duke@mail.ru

Vyacheslav A. Duke – professor, Dr. Sci. (Eng), Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 12-th Line VO, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: v_duke@mail.ru

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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.01.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.02.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 25.21.2023.

Научная статья

УДК 519.237.8

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.026>

Использование метода k-средних для оценки экономических показателей рейса судна

В.А. Семенова-Тян-Шанская¹ versem2013@yandex.ru, Т.С. Ченский¹ chenskii-tima@mail.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация В статье представлено реляционное хранилище данных, созданное для предметной области «Экономические показатели рейса судна». Описано взаимодействие с хранилищем с помощью инструментальных средств. Реализация метода k-средних производилась с помощью библиотеки Scikit-learn для языка Python. Для определения оптимального числа кластеров в работе использовались метод «локтя» и метод «силуэта». В результате выполненного анализа можно определить долю того или иного типа судна в полученных кластерах и диапазон прибылей, которую может заработать судно с известными характеристиками за рейс. С помощью результатов кластеризации можно также искать конкурирующие суда в конкретном порту. Таким образом аналитик может принять некоторые решения для оптимизации расходов или улучшения логистики в целях увеличения прибыли.

Ключевые слова: кластерный анализ, метод k-средних, хранилище данных, критерии выбора числа кластеров

Для цитирования: Семенова-Тян-Шанская В.А., Ченский Т.С. Использование метода k-средних для оценки экономических показателей рейса судна, Морские интеллектуальные технологии 2023. № 1 часть 1, С. 205—212. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.026

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.026>

Application of the k-means method to estimate the economic performance of a ship's route

Vera A. Semenova-Tyan-Shanskaya¹ versem2013@yandex.ru, Timofei S. Chenskii¹ chenskii-tima@mail.ru

¹St. Petersburg state marine technical University

Abstract The article presents a relational data warehouse created for the subject area "Economic indicators of a ship's voyage". Interaction with the repository using tools is described. The implementation of the k-means method was carried out using the Scikit-learn library for Python. To determine the optimal number of clusters, the following two methods were used: the "Elbow" method and the "Silhouette" method. As a result of the analysis, it is possible to determine the share of a particular type of vessel in the resulting clusters and the range of profits that a vessel with known characteristics can earn per voyage. Using clustering results, you can also search for competing vessels in a particular port. Thus, the analyst can make some decisions to optimize costs or improve logistics to increase profits.

Key words: cluster analysis, k-means method, data warehouse, criteria for selecting the number of clusters

For citation: V. A. Semenova-Tyan-Shanskaya, T. S. Chenskii, Application of the k-means method to estimate the economic performance of a ship's route, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 205—212. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.026

Введение

Кластерный анализ является важной техникой в быстро развивающейся области, известной как исследовательский анализ данных, и применяется в различных инженерных и научных дисциплинах. Как указано в работе [1] в таких задачах при анализе учитывается большое количество признаков, совокупно определяющих на множестве объектов разбиение, анализ которого помогает аналитику в принятии решений. Одной из основных проблем применения методов кластерного анализа в практической деятельности, как указывается в работах [2], [3], является наличие неопределенности при предварительной оценке количества кластеров, на которые разбивается исследуемая область.

Метод k-средних, самый популярный из неиерархических методов, позволяет строить так называемые эмпирические классификации, в основе которых лежит количественная обработка опытных данных. Несмотря на относительную простоту

метода, практика его применения в исследованиях и описания в публикациях имеют множество недочетов, что в последствии может привести к малой устойчивости полученных классификаций и когерентности полученных результатов. При этом, из описания упускается ряд важных моментов при применении метода k-средних, такие как мотивация выбора количества кластеров, предварительная обработка данных, особенности выбора начальных центров кластеров, применяемое программное обеспечение или алгоритмы, проверка валидности кластерного решения и т. д.

1. Выбор числа кластеров и валидация кластера

Алгоритмы метода k-средних предполагают, что исследователь самостоятельно определяет и задает число кластеров. При этом реальное количество естественных групп в наборе объектов чаще всего неизвестно.

После подготовки данных, перед исследователем стоит задача выбора алгоритма, которым будет

реализован метод k-средних. На практике исследователь выбирает конкретное программное обеспечение, в котором алгоритм уже реализован. В данной работе проведен анализ данных с использованием библиотеки Scikit-learn [4] – одной из крупнейших библиотек языка Python для машинного обучения, в которой содержатся реализации многих алгоритмов обработки данных. При этом в качестве функции расстояния для метода k-средних использовалось только Евклидово расстояние.

Числовые меры, применяемые для оценки различных аспектов валидности кластера, подразделяются на следующие три типа [2]:

1. Внешние критерии: используются для измерения степени соответствия меток кластера меткам классов, предоставленных извне. Пример: Энтропия

2. Внутренние критерии: используются для измерения качества кластерной структуры без учета внешней информации. Пример: Сумма квадратов ошибок (SSE). Этот критерий используется для измерения качества структуры кластеризации без учета внешней информации. Хорошо подходит для сравнения кластеров или результатов кластеризации. Также может использоваться для определения оптимального количества кластеров

3. Относительные критерии: используются для сравнения двух разных кластеров или результатов кластеризации. Часто используются внешние или внутренние критерии, например, SSE или энтропия.

Дополнительными внутренними критериями можно использовать связность, которая измеряет насколько тесно связаны объекты в кластере, и разделение, которое измеряет, насколько кластер отличен или отделен от других кластеров.

Для кластеров, основанных на графах, связность может быть определена как сумма весов связей в графе расстояний, которые соединяют точки внутри кластера.

Связность измеряется суммой квадратов внутри кластера:

$$WSS = \sum_i \sum_{x \in C_i} (x - m_i)^2 \quad (1)$$

Разделение измеряется суммой квадратов между кластерами:

$$BSS = \sum_i |C_i| (m - m_i)^2 \quad (2)$$

где C_i – это размер i -того кластера.

Для определения оптимального числа кластеров обычно используются следующие два метода:

1) метод «локтя»

Этот метод основан на вычислении метрики WSS, описанной выше, для разного числа k кластеров и выбора такого числа k , при котором на графиках WSS к числу k наблюдается «перелом», подробно описанный в работе [5].

2) метод «силуэта»

Коэффициент «силуэта» для точки i вычисляется по формуле из работы [6]:

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (3)$$

где $b(i)$ – наименьшая средняя дистанция от i -той точки до всех точек в любом другом кластере, а $a(i)$ – средняя дистанция i -той точки до всех других точек в ее кластере.

Для определения оптимального числа кластеров с помощью метода «силуэта» нужно построить график среднего значения коэффициента «силуэта»

к числу кластеров k и найти точку максимума коэффициента, соответствующее значение k будет являться оптимальным.

Наиболее интуитивной и часто используемой целевой функцией в иерархической кластеризации является критерий квадрата ошибки, который хорошо работает с изолированными и компактными кластерами. Квадратная ошибка для кластеризации L набора объектов X (содержащего K кластеров):

$$e^2(X, L) = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} \|x_i^{(j)} - c_j\|^2 \quad (4)$$

Где $x_i^{(j)}$ – это i -тый объект, принадлежащий j -тому кластеру, а c_j – центроид j -того кластера.

2. Описание предметной области и построение хранилища данных

Хранилище данных выступает в качестве центрального хранилища информации, поступающей из одного или нескольких источников данных [7]. Потоки данных из транзакционных систем и других реляционных баз данных, поступающих в хранилище данных, обычно состоят из структурированных и неструктурированных данных. Эти данные загружаются, обрабатываются и обновляют хранилище на регулярной основе. Подробно эти процессы описаны в работах [8], [9] - [11].

В качестве исследуемой предметной области была выбрана «Оценка экономических показателей рейса судна». Экономические показатели морской перевозки, ее рентабельность и целесообразность зависят от типа судна и принимаемого к перевозке груза, а также фрахтовых ставок и конъюнктуры рынка. Любой рейс судна нормируется по времени, количеству перевозимой продукции, доходам и расходам. Для оценки экономических показателей рейса судна были выбраны следующие признаки: 1) затраты на топливо, 2) расходы на содержание экипажа, 3) портовые расходы, 4) расходы на страхование, 5) общие расходы на весь рейс, 6) доход от перевозки груза, 7) чистый суммарный фрахт, 8) прибыль, полученная за рейс

Хранилище данных для выбранной предметной области представлено на рис.1 и имеет архитектуру «снежинка», где таблицей фактов является таблица «Рейс» (Voyage). Другие таблицы в хранилище являются таблицами измерений.

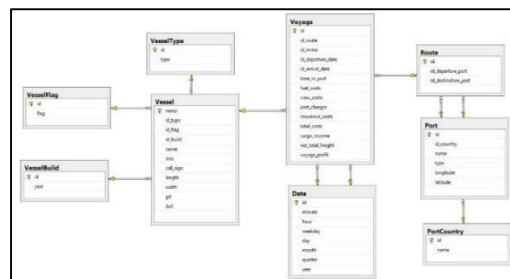


Рис. 1. Диаграмма хранилища данных

3. Сбор данных для хранилища

Данные для хранилища собирались из источника внешней информации, а конкретно с веб-сайта. В качестве метода сбора данных был выбран парсинг веб-сайта. С помощью него данные извлекались из веб-сайтов и сохранялись в удобном для дальнейшего использования csv-формате, подробно

описанном в работе [12]. Было разработано приложение на языке Python, позволяющее извлекать информацию о судах и портах и сохранять ее в формате csv-файла, согласно алгоритму, описанному в работе [14]. Данные извлекались из веб-сервиса, позволяющего отслеживать местоположение судов и просматривать информацию о них, а также информацию о портах. На рис. 2 показана часть веб-страницы, где располагается таблица с информацией о рейсах судна.

Port	Arrival (DT)	Departure (DT)	Time in Port
BRICKVA	2020-04-23 16:38	—	
KIEL	2020-04-23 19:36	2020-04-23 19:38	1 m
BREMERHAVEN	2020-04-21 21:05	2020-04-23 06:14	1 d
BRICKVA	2020-04-15 22:45	2020-04-16 15:14	12h, 20 m
ST PETERSBURG	2020-04-11 06:03	2020-04-15 20:38	14h, 20 m
SEEBERG	2020-04-09 23:04	2020-04-10 19:26	19h, 21 m
BREMERHAVEN	2020-04-07 08:16	2020-04-09 02:09	1 d
ST PETERSBURG	2020-04-02 05:07	2020-04-02 22:02	19h, 54 m
BRICKVA	2020-04-01 05:09	2020-04-01 14:12	9 h, 3 m

Рис.2 Часть веб-страницы, содержащая информацию о рейсах судна

С этой страницы извлекались данные и сохранялись в csv-файле, при этом сохранялась информация только о последнем рейсе некоторого судна. На рис.3 показана часть записей из готового csv-файла. На нем можно увидеть, что сохранялись значения таких полей, как название судна (Name), национальность судна (Flag), номер MMSI, номер IMO, позывной (Call Sign), тип судна (Type), длина судна (Length), ширина судна (Width), грузоподъемность судна (GRT), летний дедвейт судна (DWT), год постройки судна (Build), время отправления (Departure), порт отправления (Departure port), время прибытия (Arrival), порт назначения (Destination port).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
1	Name	Flag	MMSI	IMO	Call Sign	Type	Length	Width	GRT	DWT	Build	Departure port	Arrival (UTC)	Destination port	
2	GEORGI MARSDOV	Liberia	62602563	901793	DS084	Crude Oil Tanker	250	45	66,010	122,018	2012	10.02.2020 12:05	PRIMORSK	16.02.2020 0:30	TRETE
3	SEABURT	Germany	21133620	920474	DDTS	Crude Oil Tanker	177	28	21,353	32,23	2000	04.02.2020 12:54	VYSOTSK	14.02.2020 21:55	BRVAD
4	NORTSTAR	USA	36922600	923220	VY1	Vehicles/Carrier	256	36	65,314	121,437	2010	16.02.2020 02:26	ANCHORAGE	10.02.2020 22:00	TACOMA
5	SPOTTAL	Marshall Is	53000560	949429	VYH27	Oil Products Tanker	228	32	40,575	74,957	2005	20.02.2020 04:05	PRIMORSK	07.02.2020 16:04	AMSTERDAM
6	INCORO	Netherlands	24473500	922205	PMHY	Container Ship	120	19	6,226	8,000	1995	17.02.2020 18:09	ROTTERDAM	10.02.2020 12:40	HAARLEM
7	BRIGHT SPARK	Malta	24512700	882324	9H4022	General Cargo	130	19	7,949	12,15	1990	23.12.2019 9:07	ESCOMBERAS	23.12.2019 12:40	CALAS
8	IPET	Liberia	62602074	956874	ABW16	Bulk Carrier	229	38	51,225	93,2	2011	16.02.2020 12:57	WIBERG	10.02.2020 12:40	NARVIK
9	ADAMCOPE	Liberia	62601018	933802	DS107	Bulk Carrier	269	45	89,708	177,173	2007	15.02.2020 12:15	PRIMORSK	10.02.2020 15:55	PORT NEULAND

Рис.3 Часть записей из csv-файла, хранящего информацию о судах

После создания csv-файла с информацией о судах, отфильтровывались все порта заходов и извлекалась информация о них. На рис.4 показана часть веб-страницы, содержащая таблицу с информацией о конкретном порте, а на рис.5 часть записей из готового csv-файла о портах.

Для портов сохранялись значения таких полей, как название порта (Name), тип порта (Type), страна (Country), долгота (Longitude), широта (Latitude). После того, как приложение сгенерировало csv-файлы, информация из них была преобразована в SQL-запросы с использованием оператора INSERT в соответствии с той таблицей хранилища, куда

вставлялись данные. Данные, работа с которыми осуществлялась на этом этапе, можно отнести к неструктурированным, так как они представлены в виде таблиц на языке HTML. С такими данными удобно работать, так как значения полей в таблице обычно однотипны, поэтому эти значения не требуют дополнительного преобразования в какой-то формат. Единственной проблемой является извлечение значений полей из тегов. Для этого существуют специальные библиотеки, позволяющие производить синтаксический анализ документов (HTML, XML, JSON и т.д.). В рамках разработки программы для парсинга данных с сайта была использована библиотека BeautifulSoup для языка Python, практические рекомендации по которой взяты из работы [13].

Name	KIEL
UNLOCODE	—
Type	Port
Country	(DE) Germany
Longitude	10.16010°
Latitude	54.33620°
Area size	Large
Vessels In Port	48
Arrivals (24h)	44
Departures (24h)	42
Expected Arrivals	9
Local Time	2021-05-16 17:07 (UTC+01:00)
Timezone	Europe/Berlin

Рис.4 Часть веб-страницы с информацией о порте

	A	B	C	D	E
1	Name	Type	Country	Longitude	Latitude
2	VANCOUVER	Port	USA	-122.70846	45.63573
3	ANCHORAGE	Port	USA	-149.90050	61.23154
4	BREMERHAVEN	Port	Germany	8.54626	53.56870
5	WEDEL	Port	Germany	9.69998	53.56825
6	BAHIA BLANCA	Port	Argentina	-62.27370	-38.79203
7	BOTLEK - ROTTERDAM	Port	Netherlands	4.29109	51.88177
8	HELSINGBORG	Port	Sweden	12.69040	56.03530
9	OXELUND	Port	Sweden	17.11830	58.65920
10	TACOMA	Port	USA	-122.43061	47.28067
11	SABETTA	Port	Russia	72.07372	71.28124
12	NEW ORLEANS	Port	USA	-90.12018	29.90979
13	BAYUQUAN	Port	China	122.06124	40.27833

Рис.5 Часть записей из csv-файла, хранящего информацию о порте

4. Сравнение способов выбора оптимального числа кластеров

После того, как определена предметная область, настроен ETL процесс (извлечение, преобразование, загрузка), построено хранилище данных можно приступить к анализу этих данных. Для численного эксперимента были использованы следующие два отношения: 1) длина судна и прибыль рейса, 2) дедвейт и затраты на топливо.

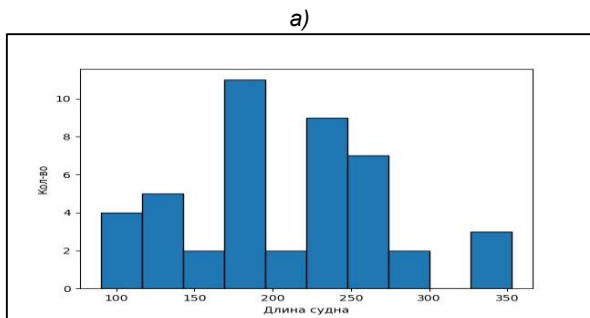
Используя «сырые», предварительно не обработанные данные, извлеченные с сайта, построим гистограммы их распределений для первого отношения (рис.6а и 6б).

Оба графика имеют распределение, близкое к нормальному, где явных выбросов не имеется. Так как значения прибыли имеют большой диапазон, то можно применить стандартную оценку (z-score), которая представляет собой количество стандартных отклонений относительно среднего значения. Z-score можно использовать, чтобы гарантировать, что входные данные имеют среднее значение равное 0 и стандартное отклонение равное 1. Это полезно, когда есть несколько выбросов, но не

настолько экстремальных, чтобы нужно было их вырезать.

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (5)$$

где μ – среднее значение, σ – стандартное отклонение, x – исходное значение.



а)

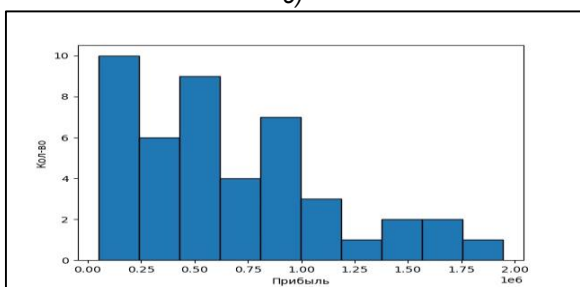


Рис. 6. а) Распределение значений длин судов, б) распределение значений прибыли

После применения стандартной оценки, получаются следующие распределения, представленные на рис. 7 и 8.

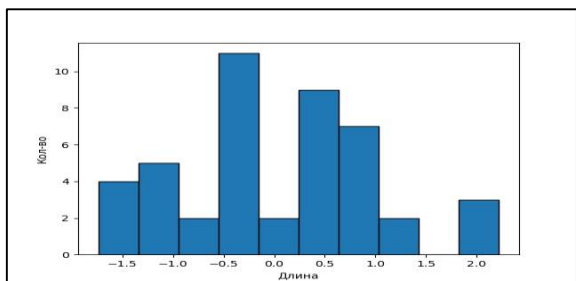


Рис. 7 Распределение значений длин судов после применения стандартной оценки

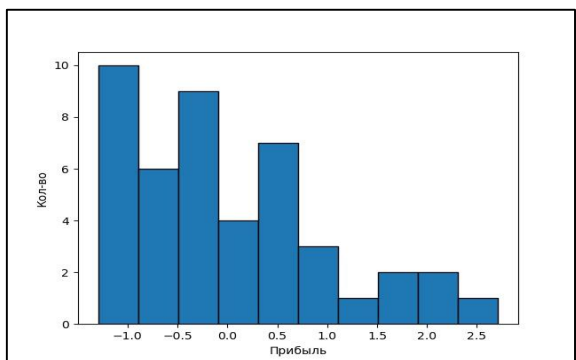


Рис. 8 Распределение значений прибыли после применения стандартной оценки

Если же исходная выборка (случай отношения дедвейт- затраты на топливо) обладает большим

разбросом данных, то используется нелинейная стандартизация, например, логарифмическое преобразование. Графики распределений данных второго отношения обработаны с применением к ним логарифмического преобразования (рис.9 и 10). Распределения становятся более похожими на нормальные.

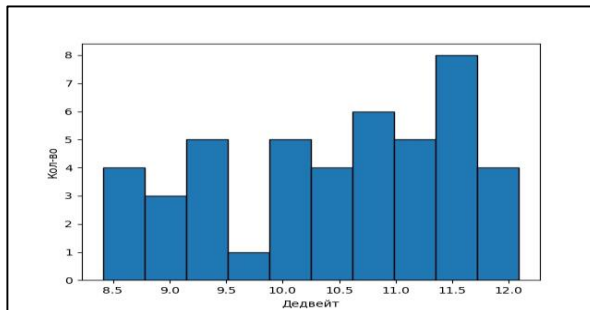


Рис. 9 Распределение значений дедвейта после применения логарифмического преобразования

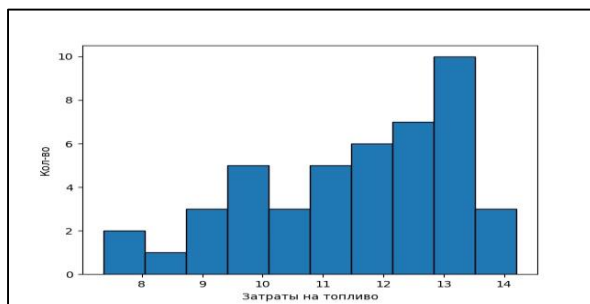


Рис. 10 Распределение значений затрат на топливо после применения логарифмического преобразования

Теперь применим к полученным распределениям алгоритм k-средних. Для определения числа кластеров будем использовать метод «локтя» и метод «силуэта», описанные выше.

А) рассмотрим отношение длина судна – прибыль за рейс в методе «локтя»

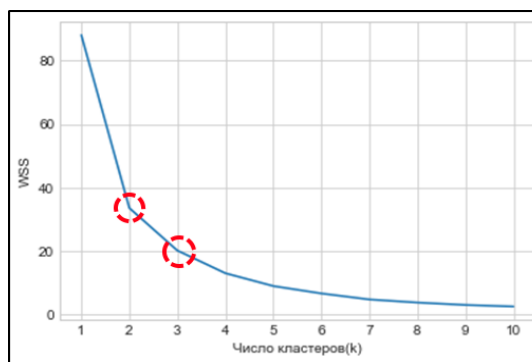


Рис. 11 График WSS к числу кластеров при использовании стандартной оценки Z-score

Метрика WSS используется в методе «локтя» (рис.11), при этом WSS считается для разного числа кластеров. Оптимальным числом кластеров является точка «перелома» на графике. В данном случае на рис.11 трудно выбрать точку «перелома», она может располагаться как в точке с $k = 2$, так и в точке с $k = 3$, где k – число кластеров.

Предположим, что точкой «перелома» является точка с $k = 3$. Применим алгоритм k -средних и получим результаты кластеризации, представленные на рис.12.

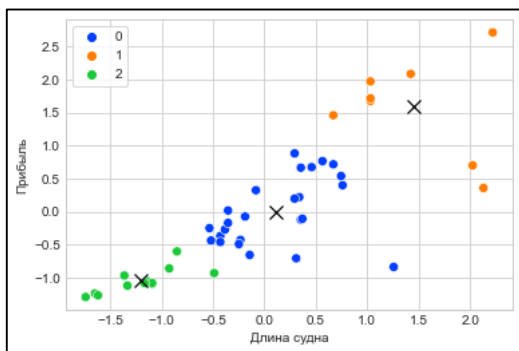


Рис.12 Результат кластеризации при $k = 3$

На рис.12 разными цветами обозначены три кластера, а крестиками – их центроиды. Как видно из рисунка принадлежность точек кластерам и сами центроиды имеют отличия.

Теперь применим метод «силуэта» для определения оптимального числа кластеров k . Смысл этого метода заключается в подсчете коэффициента «силуэта» (Silhouette Score) для разного числа кластеров. При этом оптимальным числом кластеров является точка максимума на графике.

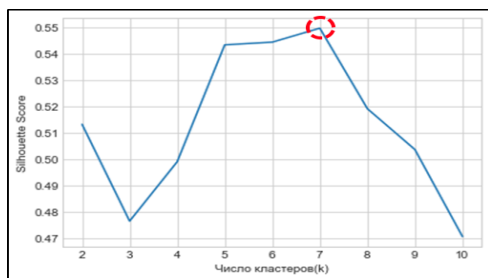


Рис.13 График Silhouette Score к числу кластеров при использовании стандартной оценки z-score

На рис.13 точка максимума выделена красным и ей соответствует число $k = 7$. Применим алгоритм k -средних для $k = 7$ и получим результаты кластеризации, представленные на рис.14.

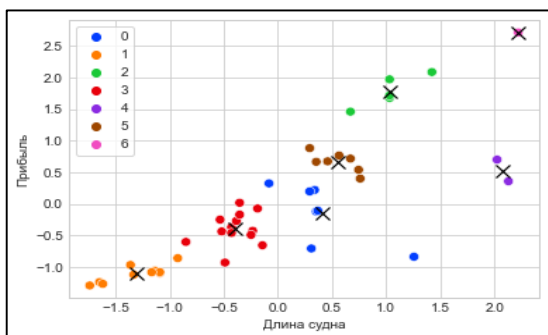


Рис.14 Результат кластеризации при $k = 7$

Б) Применим метод «локтя» во втором отношении дедвейт – затраты на топливо

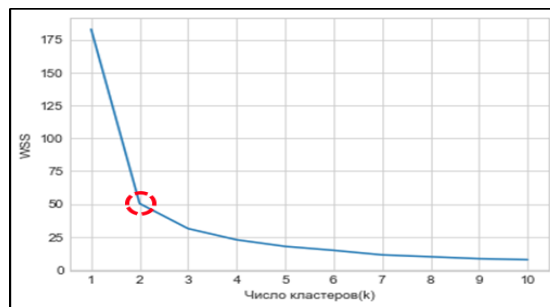


Рис.15 График WSS к числу кластеров с использованием логарифмического преобразования

На рис.15 точка «перелома» соответствует $k = 2$. Применим алгоритм k -средних для $k = 2$. Результат кластеризации представлен на рис.16.

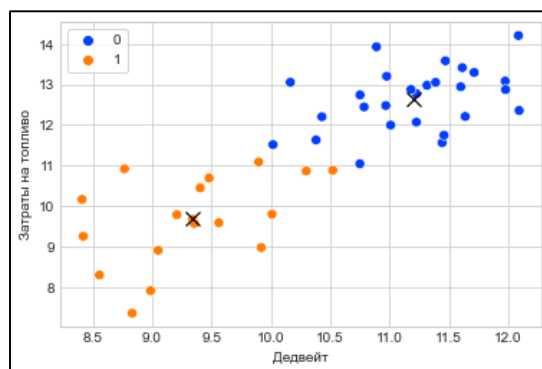


Рис.16 Результат кластеризации при $K = 2$

Теперь покажем результаты, рассчитанные по методу «силуэта».

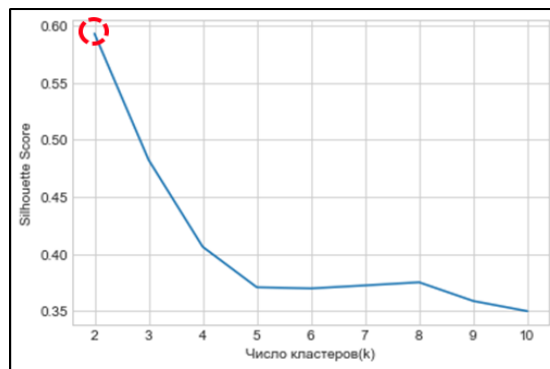


Рис.17 График Silhouette Score к числу кластеров с использованием логарифмического преобразования

На рис.17 максимум находится в точке с $k = 2$, что полностью соответствует результатам (значениям k), вычисленным с помощью метода «локтя».

5. Выводы по результатам кластеризации

После того, как число кластеров вычислено и точки распределены по кластерам можно проанализировать результат кластеризации и дать ему некоторую оценку. Рассмотрим подробнее первое отношение (длина судна – прибыль за рейс), где после применения стандартной оценки и вычисления числа кластеров с помощью метода «силуэта» получилось 7 кластеров. То есть, алгоритм k -средних нашел 7 кластеров, на которые можно разделить исходный набор судов. Посмотрим, какие

типы судов оказались наиболее распространенными в каждом кластере. На рис.16 представлено изображение с результатом кластеризации, где для каждой точки (судна) указан его тип в цифровом представлении, который можно сопоставить по таблице справа.

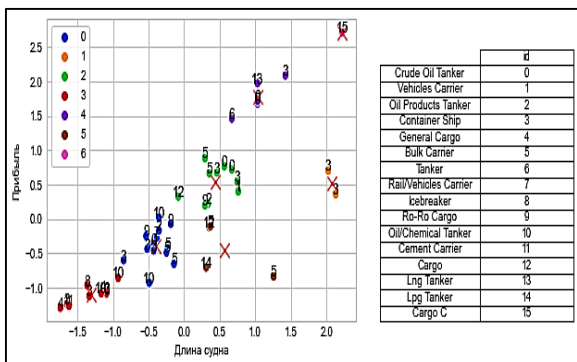


Рис.18 Распределение типов судов по кластерам

Таблица 1

Распределение типов судов по кластерам

№ кластера	Тип судна	Число вхождений
0 (синий)	Bulk Carrier	3
	Container Ship	3
	Oil/Chemical Tanker	2
	Ro-Ro Cargo	2
	Crude Oil Tanker	1
	Oil Products Tanker	1
	Rail/Vehicles Carrier	1
1 (оранжевый)	Container Ship	2
2 (зеленый)	Bulk Carrier	2
	Container Ship	2
	Crude Oil Tanker	2
	Oil Products Tanker	1
	Ro-Ro Cargo	1
	Vehicles Carrier	1
	Cargo	1
3 (красный)	Container Ship	4
	General Cargo	2
	Oil/Chemical Tanker	2
	Cement Carrier	1
	Icebreaker	1
4 (фиолетовый)	Crude Oil Tanker	2
	Lng Tanker	1
	Tanker	1
	Container Ship	1
5 (коричневый)	Bulk Carrier	2
	Cargo	1
	Lpg Tanker	1
6 (розовый)	Cargo C	1

Из таблицы 1 и рис.18 можно увидеть, что в кластере 3 (красный) преобладает тип судна – контейнеровоз (Container Ship), 40% от общего числа судов, примерная длина которых 50 – 150 метров и прибыль за рейс от 100 до 250 тыс. у.е.

В кластере 0 (синий) преобладают два типа судов – сухогруз (Bulk Carrier) и контейнеровоз (Container Ship) по 23% каждый, с длиной примерно 150 – 220 метров и прибылью за рейс 260 – 740 тыс. у.е. и т.д.

Таким образом можно определить долю того или иного типа судна в полученных кластерах и диапазон прибылей, которую может заработать судно с конкретной длиной за рейс. Также, с помощью данных результатов кластеризации можно искать конкурирующие суда.

Пусть наше судно имеет длину 350 метров и приносит за рейс 760 тыс. у.е., тогда оно попадает в кластер 1 (оранжевый) и мы видим, что конкурирующие суда имеют тип контейнеровоз (Container Ship) и получают примерно 770 – 1000 тыс. у.е. за рейс.

Во втором отношении (дедвейт – затраты на топливо), после логарифмического преобразования исходных данных, метод «силуэта» определил 2 кластера. На рис.19 представлен результат кластеризации, где для каждой точки (судна) указан его тип в цифровом представлении, который можно сопоставить по таблице справа.

Таблица 2

Распределение типов судов по кластерам

№ кластера	Тип судна	Число вхождений
0 (синий)	Bulk Carrier	6
	Container Ship	5
	Crude Oil Tanker	5
	Oil Products Tanker	2
	Cargo	2
	Ro-Ro Cargo	1
	Oil/Chemical Tanker	1
	Tanker	1
	Lng Tanker	1
	Lpg Tanker	1
	Cargo C	1
1 (оранжевый)	Vehicles Carrier	1
	Container Ship	7
	Oil/Chemical Tanker	3
	Ro-Ro Cargo	2
	General Cargo	2
	Cement Carrier	1
	Bulk Carrier	1
Rail/Vehicles Carrier	1	
Icebreaker	1	

Также, с помощью данных результатов кластеризации можно искать конкурирующие суда. Пусть наше судно имеет длину 350 метров и приносит за рейс 760 тыс. у.е., тогда оно попадает в кластер 1 (оранжевый) и мы видим, что конкурирующие суда имеют тип контейнеровоз (Container Ship) и получают примерно 770 – 1000 тыс. у.е. за рейс.

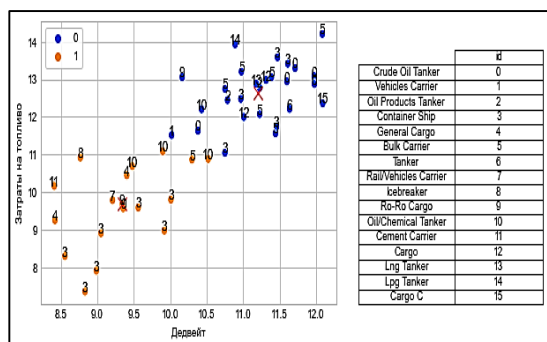


Рис. 19 Распределение типов судов по кластерам

Заключение

Исходя из полученной в результате применения метода k-средних информации, аналитик может принять некоторые решения для оптимизации расходов топлива или улучшения логистики, а также для увеличения прибыли рейса судна.

Литература

1. Tan P-N., Steinbach M., Kumar V. Introduction to Data Mining (Second Edition) [Book]. – Лондон: Pearson, 2018..
2. Jain A.K., Murty M.N., Flynn P.J. Data Clustering: A Review [Journal]. – Сан-Диего: ACM, 1999 г. - 3: Т. 31.
3. Dolnicar S., Grün B. Three good reasons NOT to use factor-cluster segmentation / Dolnicar S., Grün B. - presented at the CAUTHE 2011: National Conference: Tourism : Creating a Brilliant Blend, Adelaide, S.A. - 2011. - pp 1054–1057
4. Жерон О. Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn, Keras и TensorFlow: концепции, инструменты и техники для создания интеллектуальных систем, 2-е издание [Книга]. – Москва: Диалектика-Вильямс, 2020.
5. Селуков Д.А., Шилов В.С. Нахождение оптимального числа кластеров "методом локтя". Инновационные технологии: теория, инструменты, практика (том 1) [Журнал]. – Пермь: с. 107 – 111, 2016.
6. Rouseeuw P.J. 1987. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. Journal of Computational and Applied Mathematics. 20 (1): 53–65.
7. Almeida F. Concepts and Fundaments of Data Warehousing and OLAP [Book]. – Копенгаген: ISSUU Publishing, 2017.
8. Data consolidation-key concepts // Corporate Management <http://www.cfin.ru/itm/olap/cons.shtml>
9. Adamson C. Mastering Data Warehouse Aggregates: Solutions for Star Shema Performance.- Wiley Publishing, Inc., 2006
10. Han J. OLAP Mining: An Integration of OLAP with Data Mining. S. Spaccapietra et al. (Eds.): IFIP TC2 WG2.6 IFIP Seventh Conference on Data Semantics 1998
11. Encyclopedia of Data Warehousing and Mining. - Idea group Inc., 2006
12. Milmann M.J. and Avaizis M, editors. Scientific Python, volume 11 of Computing in Science & Engineering. IEEE/AIP, March 2011. S
13. Adamson C. Mastering Data Warehouse Aggregates: Solutions for Star Shema Performance.- Wiley Publishing, Inc., 2006
14. Мюллер А., Гвидо С. Введение в машинное обучение с помощью Python. Руководство для специалистов по работе с данными [Книга]. – Москва: Вильямс, 2017.

References

1. Tan P-N., Steinbach M., Kumar V. Introduction to Data Mining (Second Edition) [Book]. – Лондон: Pearson, 2018.
2. Jain A.K., Murty M.N., Flynn P.J. Data Clustering: A Review [Journal]. – Сан-Диего: ACM, 1999 г. - 3: Т. 31.
3. Dolnicar S., Grün B. Three good reasons NOT to use factor-cluster segmentation / Dolnicar S., Grün B. - presented at the CAUTHE 2011: National Conference: Tourism : Creating a Brilliant Blend, Adelaide, S.A. - 2011. - pp 1054–1057
4. Pedregosa et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python / Pedregosa et al. - .2016.
5. Selukov D. A., Shilov V. S. 2016. Finding the optimal number of clusters by the "elbow method". Innovative technologies: theory, tools, practice 1: 107–111. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28990633> (дата обращения: 25.10.2019)
6. Rouseeuw P.J. 1987. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. Journal of Computational and Applied Mathematics. 20 (1): 53–65.
7. Almeida F. Concepts and Fundaments of Data Warehousing and OLAP [Book]. – Копенгаген: ISSUU Publishing, 2017.
8. Data consolidation-key concepts // Corporate Management <http://www.cfin.ru/itm/olap/cons.shtml>
9. Adamson C. Mastering Data Warehouse Aggregates: Solutions for Star Shema Performance.- Wiley Publishing, Inc., 2006
10. Han J. OLAP Mining: An Integration of OLAP with Data Mining. S. Spaccapietra et al. (Eds.): IFIP TC2 WG2.6 IFIP Seventh Conference on Data Semantics 1998
11. Encyclopedia of Data Warehousing and Mining. - Idea group Inc., 2006
12. Milmann M.J. and Avaizis M, editors. Scientific Python, volume 11 of Computing in Science & Engineering. IEEE/AIP, March 2011. S

13. Adamson C. Mastering Data Warehouse Aggregates: Solutions for Star Schema Performance. - Wiley Publishing, Inc., 2006
14. Mueller A.C. and Sarah Guido An Introduction to Machine Learning with Python (O'Reilly) by. Copyright 2017

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

Вера Александровна. Семенова-Тян-Шанская, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: versem2013@yandex.ru

Vera A. Semenova-Tyan-Shanskaya Ph.D. (Eng), Associate professor of the Computer Science Department, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: versem2013@yandex.ru

Тимофей Сергеевич Ченский, магистрант кафедры вычислительной техники и информационных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: chenskii-tima@mail.ru

Timoty S.Chenskii, master's student of the Computer Science Department, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: chenskii-tima@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 16.12.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 21.12.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 26.12.2022.

Научная статья

УДК 681.883 : 519.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.027>

Вероятностная характеристика обнаружения сигнала в обнаружителе с порогами по уровню и длительности

С.Б. Егоров¹ Stanislav.Egorov.1938@gmail.com, Р.И. Горбачев¹ gorbatschow.r@gmail.com¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Рассматривается автоматический обнаружитель шумового сигнала движущегося источника шумоизлучения, работающий непрерывно во времени и переходящий в режим обнаружения, когда источник входит в телесный угол главного максимума характеристики направленности (ХН) приемной антенны. Обнаружитель содержит индикаторное устройство, состоящее из двух последовательно включенных селекторов сигнала: первого – по уровню, второго – по длительности. Вероятностная характеристика обнаружения сигнала для такого обнаружителя определена на конечном интервале времени, «привязанном» к моменту прохождения источником максимума ХН. При получении вероятностной характеристики обнаружения использованы вероятностные характеристики суммарного (сигнально-помехового) индикаторного процесса на конечном интервале времени, а также «выбросовая» трактовка работы обнаружителя на конечном интервале времени. Формула вероятностной характеристики получена и проанализирована для нормализованного суммарного индикаторного процесса. При важных для практики условиях предложены простые соотношения для определения порогового значения индикаторного отношения сигнал/помеха.

Ключевые слова: режим обнаружения сигнала, интервал времени обнаружения, вероятностная характеристика обнаружения, двухпороговый обнаружитель.

Для цитирования: Егоров С.Б., Горбачев Р.И., Вероятностная характеристика обнаружения сигнала в обнаружителе с порогами по уровню и длительности, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 213—218. DOI: 37220/MIT.2023.59.1.027

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.027>

Probability function of detection for signal detector with level and time thresholds

Stanislav B. Egorov¹ Stanislav.Egorov.1938@gmail.com, Roman I. Gorbachev¹ gorbatschow.r@gmail.com¹State-marine technical university of Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. This article considers an automatic detector of a noise signal from a moving source, which operates continuously in time and switches to the detection mode when the source enters to the solid angle of the main directivity beam of the receiver's antenna. The detector contains an indicator block consisting of two signal selectors connected one after another: the first one by level, the second one by time. The probability function of signal detection for such detector is determined on a finite time interval relative to the moment when the signal source passes the main beam. To obtain the probability function of detection, we used the probability function of the summary (signal plus noise) indicator process on a finite time interval. This model is inherited from our previous publications and known as the "emissional" interpretation of the detector's operation on a finite time interval. The equation for the probability function of signal detection is obtained and analyzed for the normalized summary indicator process. According to conditions important for practice, simple relationships are proposed to determine the threshold value of the indicator signal-to-noise ratio.

Keywords: signal detection mode, signal detection interval, detection probability function, double threshold detector.

For citation: Stanislav B. Egorov, Roman I. Gorbachev, Probability function of detection for signal detector with level and time thresholds, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 213—218. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.027

Введение

Рассматривается автоматический обнаружитель шумового сигнала движущегося источника шумоизлучения, работающий непрерывно во времени до момента срабатывания. Обнаружитель включает в себя приемный тракт с направленной антенной, формирователь решающей статистики в режиме «скользящего окна» – формирователь индикаторного процесса, а также два последовательно включенных пороговых устройства – селектора сигнала по уровню и длительности.

Для оценки эффективности такого обнаружителя по критерию Неймана-Пирсона необходимы две

вероятностные характеристики: ожидания и обнаружения сигнала. Вероятностная характеристика ожидания сигнала – это зависимость вероятности ложной тревоги, заданной на известном интервале ожидания, от длительности этого интервала, от порогов обнаружения по уровню и длительности, а также от вероятностных свойств и параметров помехового индикаторного процесса.

Характеристика ожидания с заявленными свойствами получена для рассматриваемого обнаружителя в [1]. Формула выведена для нормализованного помехового индикаторного процесса. При выводе учтена непрерывность работы обнаружителя во времени, в связи с чем

использованы вероятностные характеристики случайного процесса на конечном интервале времени, в том числе характеристики выбросов процесса.

Вероятностная характеристика обнаружения сигнала – это зависимость вероятности правильного обнаружения от времени работы в режиме обнаружения, от порогов обнаружения по уровню и длительности, а также от вероятностных свойств и параметров суммарного (сигнально-помехового) индикаторного процесса.

В известных нам работах по теории обнаружения сигналов, в том числе в [2] [3] [4] [5], характеристики обнаружения с указанными свойствами отсутствуют. Ситуация не меняется и в работах последнего времени, например, в [6] [7] [8]. Причиной является использование при вероятностном анализе обнаружителей одномерных функций плотности вероятности решающих статистик.

Целью данной работы является получение вероятностной характеристики обнаружения с заявленными свойствами для рассматриваемого обнаружителя при условии нормализации суммарного индикаторного процесса. Кроме того, полученная характеристика анализируется в целях определения порогового индикаторного отношения сигнал/помеха, необходимого для оценки эффективности обнаружителя.

Физическая модель работы автоматического обнаружителя в режиме обнаружения сигнала

После включения питания и завершения начальной адаптации к окружающим помехам обнаружитель начинает работать в режиме ожидания сигнала. Из шумовой помехи на выходе приемного тракта непрерывно, в режиме «скользящего окна», формируются мгновенные значения решающей статистики или текущие значения помехового индикаторного процесса $u_n(t)$.

Эти значения непрерывно сравниваются с порогом обнаружения по уровню u_0 . При появлении положительного выброса выше u_0 его длительность контролируется и ложная тревога может возникнуть, если длительность достигнет порога τ_0 . Объектом обнаружителя является движущийся источник стационарного шумоизлучения – источник сигнала.

Обнаружитель автоматически переходит из режима ожидания в режим обнаружения, когда источник сигнала входит в телесный угол высокой чувствительности приемного тракта – в телесный угол, в который вписывается главный максимум пространственной характеристики направленности (ХН) приемной антенны.

Формируемый при этом суммарный сигнально-помеховый индикаторный процесс $u_\Sigma(t)$ становится нестационарным. Его математическое ожидание (МО) растет с приближением источника к направлению оси ХН антенны и достигает максимума в момент t_M выхода источника на направление оси ХН.

Благодаря конечной угловой ширине максимума ХН существует интервал времени от $t_M - \Delta t_1$ до $t_M + \Delta t_2$, на котором процесс $u_\Sigma(t)$ имеет

практически неизменные статистические параметры, равные параметрам в момент t_M . Это позволяет использовать стационарную модель сигнально-помехового процесса $u_\Sigma(t)$ на интервале времени длительностью $T_M = \Delta t_1 + \Delta t_2$.

Назовем его «интервалом обнаружения сигнала» и определим вероятность правильного обнаружения сигнала на этом интервале.

Вероятностная модель работы обнаружителя в режиме обнаружения на конечном интервале времени

Полагаем, что сигнально-помеховый индикаторный процесс $u_\Sigma(t)$ наблюдается и непрерывно контролируется на интервале времени $t \in [0, T_M]$ при условии, что текущее значение процесса в момент $t=0$ находится ниже уровня обнаружения u_0 .

Для принятия правильного решения «сигнал обнаружен» необходимо и достаточно появления положительного выброса процесса $u_\Sigma(t)$ относительно уровня u_0 длительностью $\tau \geq \tau_0$ в пределах интервала $t \in [0, T_M]$.

Следовательно, принятию решения «сигнал обнаружен» эквивалентно совместное появление двух случайных событий:

- на интервале времени от момента $t=0$ до момента $T_M - \tau_0$ текущее значение процесса $u_\Sigma(t)$ достигает уровня u_0 , т.е. появляется начало положительного выброса;
- длительность τ начавшегося выброса достигает пороговой величины τ_0 .

Рисунок 1 поясняет необходимость совместного появления указанных событий.

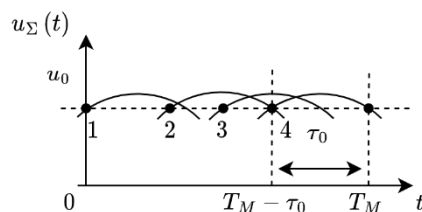


Рис 1 – Положение выброса длительностью $\tau = \tau_0$ и его начальных моментов 1,2,3,4 на интервале $t \in [0, T_M]$.

Альтернативой появлению начала положительного выброса на интервале $T_M - \tau_0$ является недостижение текущими значениями процесса $u_\Sigma(t)$ уровня u_0 на это интервале. Вероятность недостижения стационарным процессом $u(t)$ некоторого уровня u на интервале времени T , если его текущее значение было ниже уровня u в начале интервала, определяется функцией распределения вероятностей (ФРВ)

процесса $F(u, T)$ на интервале T [9]. Полагаем, что такая ФРВ процесса $u_{\Sigma}(t)$ известна. Тогда вероятность $P(0)$ неоявления начала выброса на интервале $T_M - \tau_0$ равна значению ФРВ процесса на этом интервале

$$P(0) = F(u_0, T_M - \tau_0), \quad (1)$$

а вероятность появления начала выброса $P(1)$ на интервале $T_M - \tau_0$ равна

$$P(1) = 1 - P(0) = 1 - F(u_0, T_M - \tau_0). \quad (2)$$

Полагаем, что длительность положительного выброса стационарного процесса не зависит от момента его начала во времени. Считаем известной ФРВ длительности положительных выбросов случайного процесса $u_{\Sigma}(t)$ – функции $F_+(u_0, \tau)$. Значение этой функции равно вероятности того, что выброс выше u_0 не достигает длительности τ [9]. Тогда вероятность достижения и превышения длительностью выброса процесса $u_{\Sigma}(t)$ величины τ_0 $P(\tau \geq \tau_0)$ равна

$$P(\tau \geq \tau_0) = 1 - F_+(u_0, \tau_0). \quad (3)$$

Независимость двух названных событий и эквивалентность их совместного появления принятию решения «сигнал обнаружен» позволяют записать равенство:

$$P_{\text{ПЮ}}(T_M) = (1 - F(u_0, T_M - \tau_0))(1 - F_+(u_0, \tau_0)). \quad (4)$$

Такова вероятностная модель работы обнаружителя в режиме обнаружения непрерывно на конечном интервале времени в районе максимума проходной характеристики источника сигнала.

Вероятностная характеристика обнаружения в автоматическом обнаружителе с нормализованным сигнально-помеховым индикаторным процессом

Полагаем, что в обнаружителе выполняется условие нормализации суммарного сигнально-помехового индикаторного процесса $u_{\Sigma}(t)$: длительность импульсной характеристики последетекторного фильтра нижних частот значительно превышает интервал корреляции последетекторного суммарного сигнально-помехового процесса. В этом случае процесс $u_{\Sigma}(t)$ нормальный и стационарный на интервале времени обнаружения T_M .

Пусть известны три статистических параметра этого процесса в момент времени t_M и, следовательно, на интервале T_M : математическое ожидание (МО) $\mu_{u_{\Sigma}}(t_M) = \mu_{u_{\Sigma}}$, среднее квадратичное отклонение (СКО) $\sigma_{u_{\Sigma}}(t_M) = \sigma_{u_{\Sigma}}$ и средняя квадратичная частота флюктуаций $f_{u_{\Sigma}}(t_M) = f_{u_{\Sigma}}$, связанная с нормированной автокорреляцией $R_{u_{\Sigma}}(\tau, t_M)$ соотношением

$$f_{u_{\Sigma}}(t_M) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-R''_{u_{\Sigma}}(0, t_M)}. \quad (5)$$

Тогда ФРВ нормального стационарного процесса с такими параметрами известна [9] и для уровня u_0 на интервале времени $T_M - \tau_0$ определяется выражением:

$$F(u_0, T_M - \tau_0) = \Phi(k_{\Sigma}) \times \exp\left(-\frac{f_{u_{\Sigma}}(T_M - \tau_0)}{\Phi(k_{\Sigma})} \exp\left(-\frac{k_{\Sigma}^2}{2}\right)\right), \quad (6)$$

где

$$k_{\Sigma} = \frac{u_0 - \mu_{u_{\Sigma}}}{\sigma_{u_{\Sigma}}} \quad (7)$$

– относительный уровень обнаружения;

$$\Phi(k_{\Sigma}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{k_{\Sigma}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (8)$$

– интеграл вероятности Лапласа.

Известна и ФРВ длительности положительных выбросов такого процесса относительно уровня u_0 [9]

$$F_+(\tau, u_0) = 1 - \exp\left(-\frac{f_{u_{\Sigma}}\tau}{1 - \Phi(k_{\Sigma})} \exp\left(-\frac{k_{\Sigma}^2}{2}\right)\right). \quad (9)$$

Используя (6), (9) и (4), получаем выражение для вероятности правильного обнаружения на интервале обнаружения T_M :

$$P_{\text{ПЮ}}(T_M) = (1 - \Phi(k_{\Sigma})) \times \exp\left(-\frac{f_{u_{\Sigma}}(T_M - \tau_0)}{\Phi(k_{\Sigma})} \exp\left(-\frac{k_{\Sigma}^2}{2}\right)\right) \times \exp\left(-\frac{f_{u_{\Sigma}}\tau_0}{1 - \Phi(k_{\Sigma})} \exp\left(-\frac{k_{\Sigma}^2}{2}\right)\right). \quad (10)$$

Преобразуем это выражение к виду, удобному для определения порогового значения индикаторного отношения сигнал/помеха (ИОСП). Это отношение по определению равно:

$$\gamma = \frac{\mu_{us}}{\sigma_{un}}, \quad (11)$$

где $\mu_{us}(t_M) = \mu_{us}$ – сигнальная составляющая МО $u_{\Sigma}(t)$:

$$\mu_{u_{\Sigma}} = \mu_{un} + \mu_{us}, \quad (12)$$

μ_{un} , σ_{un} – МО и СКО помехового индикаторного процесса $u_n(t)$.

Кроме того, выделим в явном виде относительные пороги обнаружения по уровню

$$k = \frac{u_0 - \mu_{un}}{\sigma_{un}} \quad (13)$$

и длительности

$$x = f_{un}\tau_0, \quad (14)$$

где f_{un} – СКЧ процесса $u_n(t)$. Эти пороги известны и определены из вероятностной характеристики ожидания сигнала в автоматическом обнаружителе [1].

Используя (12), (13) и (14), преобразуем соотношение (7):

$$k_{\Sigma} = \frac{u_0 - \mu_{u\Sigma}}{\sigma_{u\Sigma}} = (k - \gamma) \frac{\sigma_{um}}{\sigma_{u\Sigma}}. \quad (15)$$

Далее учтем, что пороговое ИОСП γ определяется для пороговых величин $P_{\text{ПО}}(T_M) \geq 0.9$, а последние достигаются при $\gamma > k$, т.е. при $k_{\Sigma} < 0$ в (15).

Используя свойство интеграла вероятности

$$\Phi(-k_{\Sigma}) = 1 - \Phi(k_{\Sigma}) \quad (16)$$

и рассматривая обнаружение слабого сигнала, когда отношение сигнал/помеха по мощности на выходе приемного тракта заметно меньше единицы и допустимы приближения

$$\frac{\sigma_{um}}{\sigma_{u\Sigma}} \approx 1, \quad \frac{f_{u\Sigma}}{f_{um}} \approx 1, \quad (17)$$

получим выражение для вероятностной характеристики обнаружения в этих условиях:

$$P_{\text{ПО}}(T_M) = (1 - (1 - \Phi(k_{\Sigma}))) \times \exp\left(-\frac{f_{um}T_M - x}{1 - \Phi(k_{\Sigma})} \exp\left(-\frac{k_{\Sigma}^2}{2}\right)\right) \times \exp\left(-\frac{x}{\Phi(k_{\Sigma})} \exp\left(-\frac{k_{\Sigma}^2}{2}\right)\right), \quad (18)$$

где

$$k_{\Sigma} = \gamma - k. \quad (19)$$

Анализ вероятностной характеристики обнаружения

Выражение (18) прозрачно для качественного анализа. Прежде всего, оно применимо только при условии

$$f_{um}T_M - x = f_{um}(T_M - \tau_0) \geq 0, \quad (20)$$

т. к. при $\tau_0 > T_M$ обнаружение сигнала невозможно.

При $T_M = \tau_0$ вероятностная характеристика имеет вид:

$$P_{\text{ПО}} = \Phi(k_{\Sigma}) \exp\left(-\frac{x}{\Phi(k_{\Sigma})} \exp\left(-\frac{k_{\Sigma}^2}{2}\right)\right) \quad (21)$$

и учитывает только загроуение обнаружителя за счет порога по длительности.

При $T_M > \tau_0$ и отсутствии селектора по длительности ($x = 0$) вероятностная характеристика учитывает очувствление обнаружителя за счет непрерывного повторения процедуры обнаружения на конечном отрезке времени:

$$P_{\text{ПО}}(T_M) = 1 - (1 - \Phi(k_{\Sigma})) \times \exp\left(-\frac{f_{um}T_M}{1 - \Phi(k_{\Sigma})} \exp\left(-\frac{k_{\Sigma}^2}{2}\right)\right). \quad (22)$$

Наконец, полное выражение (18) учитывает и загроуение и очувствление обнаружителя. При известных значениях $f_{um}T_M$, x и заданной величине $P_{\text{ПО}}$ трансцендентное уравнение (18) решается относительно неизвестного k_{Σ} , а пороговая величина γ_0 определяется из (19):

$$\gamma_0 = k_{\Sigma} + k. \quad (23)$$

Определение γ_0 упрощается при $P_{\text{ПО}} \geq 0.95$ и $f_{um}(T_M - \tau_0) \geq 1$. При этих условиях пороговое значение k_{Σ} в (18) превышает 2.5 и допустимы приближения:

$$1 - \Phi(k_{\Sigma}) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}k_{\Sigma}} \exp\left(-\frac{k_{\Sigma}^2}{2}\right), \quad \frac{1}{\Phi(k_{\Sigma})} \approx 1. \quad (24)$$

Тогда (18) имеет приближенный вид:

$$P_{\text{ПО}} \approx \exp\left(-x \exp\left(-\frac{k_{\Sigma}^2}{2}\right)\right), \quad (25)$$

откуда

$$k_{\Sigma} = \sqrt{2 \ln\left(\frac{x}{\ln(P_{\text{ПО}}^{-1})}\right)}, \quad (26)$$

$$\gamma_0 = k + \sqrt{2 \ln\left(\frac{x}{\ln(P_{\text{ПО}}^{-1})}\right)}. \quad (27)$$

В [1] показано, что требуемая величина вероятности ложной тревоги на интервале ожидания сигнала может быть обеспечена при пороге обнаружения по уровню

$$u_0 = \mu_{um}, \quad (28)$$

т.е. при $k = 0$. Для этого достаточно установить относительный порог по длительности равным величине

$$x = 0.5 \ln(P_{\text{ЛТ}}^{-1}), \quad (29)$$

где $P_{\text{ЛТ}} = P_{\text{ЛТ}}(T_0)$ – вероятность ложной тревоги на интервале ожидания T_0 .

Следовательно, пороговое значение ИОСП γ_0 в этом случае определяется выражением

$$\gamma_0 = \sqrt{2 \ln\left(\frac{1}{2} \frac{\ln(P_{\text{ЛТ}}^{-1})}{\ln(P_{\text{ПО}}^{-1})}\right)}. \quad (30)$$

Из (30) при $P_{\text{ЛТ}} = 10^{-3}$ и $P_{\text{ПО}} = 0.95$ получаем $\gamma_0 = 2.9$ что отвечает условию $k_{\Sigma} > 2.5$ приближений (24).

Заключение

В рамках представленных в данной статье моделей получено общее выражение (10) для вероятностной характеристики обнаружения сигнала движущегося источника шумоизлучения автоматическим обнаружителем, в которой учитывается влияние на пороговое ИОСП γ_0

селекции сигнала по уровню и длительности, а также конечной длительности контакта с источником сигнала.

Анализом полученной характеристики показана возможность в важных для практики случаях использовать простые соотношения (27) и (30) для определения пороговой величины ИОСП.

Литература

1. Егоров С.Б., Горбачев Р.И. Вероятностная характеристика ожидания сигнала в двухпороговом обнаружителе // Морские интеллектуальные технологии, Т. 1, № 4, 2022. С. 156-161.
2. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. Радио, 1974.
3. Ольшевский В.В. Статистические методы в гидролокации. Л.: Судостроение, 1983.
4. Сосулин Ю.Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. М.: Сов. Радио, 1978.
5. Белецкий Ю.С. Методы и алгоритмы контрастного обнаружения сигналов на фоне помех с априори неизвестными характеристиками. М.: Издательство "Радиотехника", 2011.
6. Костылев В.И., Гресь И.П. Обобщенное энергетическое обнаружение случайного гауссовского сигнала в случайном коррелированном шуме // Вестник Воронежского института МВД России, № 2, 2013. С. 136-144.
7. Нарбеков А.Ю. Улучшение характеристик обнаружения случайного радиотехнического сигнала при воздействии некоррелированных шумов // Вестник РГРТУ, № 59, 2017. С. 36-41.
8. Abraham D.A. Underwater Acoustic Signal Processing Modeling, Detection, and Estimation. Ellicott City: Springer, 2019.
9. Денисенко А.Н. Сигналы. Теоретическая радиотехника. Справочное пособие. М.: Горячая линия-Телеком, 2005.

References

1. Egorov S.B., Gorbachev R.I. Veroyatnostnaya karakteristika ozhidaniya signala v dvuxporogovom obnrauzhitеле [Probability function of waiting for double threshold detector]; Morskije Intellektual'ny'e Texnologii, Vol. 1, No. 4, 2022. pp. 156-161.
2. Levin B.R. Teoreticheskie osnovy` statisticheskoy radiotekhniki [Theoretical basics of statistical radio engineering]. M.: Sov. Radio, 1974.
3. Ol'shevskij V.V. Statisticheskie metody` v gidrolokacii [Statistical methods in hydrolocation]. L.: Sudostroenie, 1983.
4. Sosulin Y.G. Teoriya obnaruzheniya i ocenivaniya stoxasticheskix signalov [Theory of detection and estimation of stochastic signals]. M.: Sov. Radio, 1978.
5. Beletsky Y.S. Metody` i algoritmy` kontrastnogo obnaruzheniya signalov na fone pomex s apriori neizvestny`mi karakteristikami [Methods and algorithms for contrast detection of signals in background noise presence with a priori unknown characteristics]. M.: Radiotekhnika, 2011.
6. Kostylev V.I., Gres` I.P. Obobshhennoe e`nergeticheskoe obnaruzhenie sluchajnogo gaussovskogo signala v sluchajnom korrelirovannom shume [Generalized energy detection of random gaussian signal in random correlated noise]. Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii, No. 2, 2013. pp. 136-144.
7. Narbekov A.Y. Uluchshenie karakteristik obnaruzheniya sluchajnogo radiotekhnicheskogo signala pri vozdeystvii nekorrelirovanny`x шумов [Improving random RF signal detection performance when exposed to uncorrelated noise]. Vestnik RGRTU, No. 59. pp. 36-41.
8. Abraham D.A. Underwater Acoustic Signal Processing Modeling, Detection, and Estimation. Ellicott City: Springer, 2019.
9. Denisenko A.N. Signaly`. Teoreticheskaya radiotekhnika. Spravochnoe posobie. [Signals. Theoretical radio engineering. Reference guide]. M.: Goryachaya liniya - Telekom, 2005

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. Лоцманская, 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 30.01.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 31.01.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 02.02.2023.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Научная статья

УДК 656.615

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.028>

Распределение контейнеров по «бэям» при составлении грузового плана контейнеровоза

А.Л. Кузнецов¹ thunder1950@yandex.ru, А.В. Кириченко¹ KirichenkoAV@gumrf.ru,

А.Д. Семенов¹ asemyonov054@gmail.com, А.М. Сампиев² adam.sampiev@lenmor.ru

¹Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,

²ЛЕНМОРНИИПРОЕКТ

Аннотация. Одной из наиболее важных и сложных задач в управлении контейнерной линией является составление грузового плана контейнеровоза. Необходимость учитывать не только физические характеристики судна, но и коммерческие параметры контейнеров делает эту задачу более сложной, чем составление грузового плана универсального судна. Вместимость современных контейнеровозов не позволяет решать эту задачу вручную. В мировой практике перевозок используются специализированные программные средства для составления и проверки грузового плана контейнеровоза. Изменение структуры рынка морских контейнерных перевозок приводит к необходимости решить задачу по автоматическому составлению грузового плана. Данная работа подтверждает, что решение этой задачи требует многоэтапного подхода. Одним из этапов составления грузового плана является распределение контейнеров по «бэям» судна. В статье представлен один из возможных алгоритмов распределения контейнеров по «бэям», основанный на средней массе контейнеров в каждом «бэе». Авторы показывают, что количество непроизводительных перемещений может быть сокращено за счет сортировки контейнеров по портам назначения. Следующим этапом исследования является решение задачи по распределению контейнеров внутри одного отдельного «бэя».

Ключевые слова: контейнерные перевозки, грузовой план, алгоритм группировки, морская перевозка, «бэй план», контейнеровоз

Для цитирования: Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Семенов А.Д., Сампиев А.М. Аналитическая симуляционная модель произвольной системы массового обслуживания/ Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 219—223. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.028

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.028>

The algorithm of container grouping for the bayplan creation purposes

Alexander L. Kuznetsov¹ thunder1950@yandex.ru, Alexander V. Kirichenko¹ KirichenkoAV@gumrf.ru,

Anton D. Semenov¹ asemyonov054@gmail.com, Adam M. Sampiev² adam.sampiev@lenmor.ru

¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping after admiral S. O. Makarov,

²LENMORNIIIPROEKT

Annotation. One of the most important and complicated tasks in the container line management is the development of containership's bayplan. The requirement take into account not just physical characteristics of a ship, but also the commercial parameters of containers makes this task more complicated than generation of general-purpose ships' cargo stowage plan. The container capacity of modern ship makes it impossible to create a bayplan without computerization. In the world practice special computer-aided systems are introduced to create and check a bayplan. The changes in container shipping market lead to the necessity to solve the problem of automatic bayplan generation. The paper shows that this solution requires multi-step approach. One of the possible step in the algorithm is to group the containers to the ship bays. The paper shows one of the possible methods to make it, based on the information about average bay weight. Authors prove that the number of unproductive moves can be reduced if the list of containers is sorted by the port of destination. The next step of the research is to solve the task of container positioning within a bay.

Key words: container shipping, cargo stowage plan, grouping algorithm, sea carriage, bay plan, containership

For citation: Aleksandr L. Kuznetsov, Aleksandr V. Kirichenko, Anton D. Semenov, Adam M. Sampiev The algorithm of container grouping for the bayplan creation purposes 2023. № 1 part 1, P. 219—223. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.028

Введение

Исторически задача формирования грузового плана судна относилась к оптимизационным, хотя

анализ показывает, что всегда было понимание невозможности её классического решения [1, 2]. На решение задачи влияют такие множественные факторы различной природы, как обеспечение

необходимой посадки судна (крена, дифферента) [3], устойчивости и плавности качки путём достижения необходимой метацентрической высоты [4], необходимого уклона штабеля (палубного каравана) от кормовой надстройки к носу [5], последовательности захода в порты ротации с учетом лишь частичной выгрузки и погрузки в каждом [6, 7].

В последний период задача составления грузового плана контейнерного судна на терминале представляется мало актуальной. Во-первых, имеющийся полувековой опыт успешной эксплуатации морской контейнерной системы транспортировки грузов конструктивно доказывает ее работоспособность, т. е. указывает на отсутствие указанной проблемы. Во-вторых, контейнерооборот отечественной морской транспортной системы резко снизился, что заставляет думать о соответствующем снижении интереса к проблеме. В то же время, сегодня перед отечественной морской индустрией поставлены настолько масштабные задачи, что решить их без коренной реорганизации всей системы невозможно. Эта реорганизация затрагивает все компоненты: морские суда, подходные каналы, гидротехнические сооружения, терминалы, смежный транспорт. Особую роль при этом приобретает координация работы всех перечисленных компонент, без которой не может быть обеспечена ни экономическая, ни технологическая эффективность системы. Одной из центральных задач при этом является обеспечение максимальной производительности грузообработки при гарантированной безопасности мореплавания. Анализ показывает, что ключевым звеном здесь является, как ни странно, именно планирование загрузки судна, в значительной мере определяющее все операции терминала, как складские, так и связанные с обработкой смежного транспорта.

В отсутствие собственного контейнерного флота составление грузового плана де-факто отошло к грузоперевозчикам, т. е. судовладельцам [2]. За рубежом исследованиям методов централизованного рационального бэй-планирования в линейных компаниях уделяется пристальное внимание [8, 9, 10]. Как следствие, растущая сложность и совершенствование методов планирования осталась незамеченной отечественными участниками транспортного процесса. В лучшем случае влияние бэй-плана учитывалось при планировании терминальных операций.

Задача расположения контейнеров в ячейках специализированного судна относится к комбинаторным задачам трехмерного размещения. Общих методов решения подобных задач не существует даже для одного или нескольких критериев. В практических случаях критериев размещения насчитывается десятки. Очевидно, что этот класс задач требует использования компьютера для реализации эвристик большей или меньшей сложности. На основе естественного отбора на рынке соответствующих им решений укрепилась несколько специализированных компаний, практически свободных от конкуренции. Отключение отечественного контейнерного бизнеса от соответствующего сегмента ПО может оказаться неожиданной и крайне масштабной проблемой.

Решению указанной задачи и посвящена данная работа, в которой описывается укрупненная процедура бэй планирования и предлагается алгоритм нахождения решения для начального ее этапа.

В данном документе описывается подход к распределению контейнеров по бэям для составления грузового плана судна. Описываемый метод является одним из этапов составления грузового плана контейнеровоза.

Рассмотрим маршрут типовой контейнерной линии, обычно включающий в себя несколько портов захода (рис. 1).

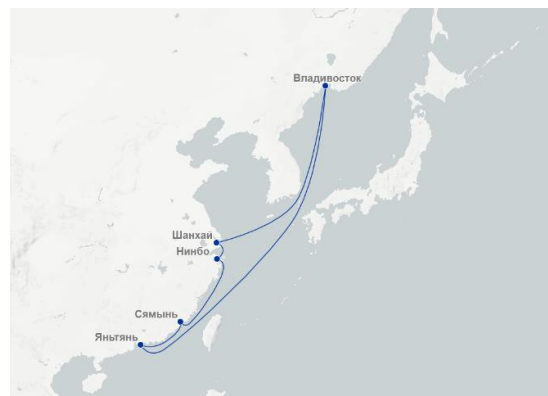


Рис. 1. Пример маршрута морской контейнерной линии

В каждом порту маршрута перед погрузкой судна необходимо сформировать новый грузовой план судна, который будет включать в себя оставшиеся нетронутыми контейнеры, следующие в следующие порты ротации, и дополняться позициями в трюме судна контейнеров, принятых к перевозке на судне. Трюмы специализированного ячеистого контейнерного судна разделяются на отдельные поперечные секции («бэй»), предназначенные для хранения 20-ти или 40-футовых контейнеров.

Позиционирование контейнеров на судне включает в себя определение их адреса на судне, состоящем из бэя, ряда и яруса, в которые должен быть установлен контейнер (рис. 2).

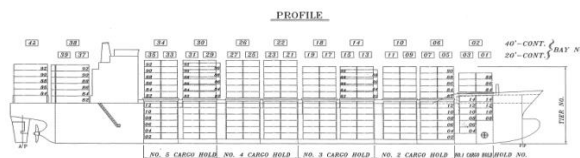


Рис. 2. Схема адресации контейнеровоза

В практике морских перевозок считается, что дифферент судна-контейнеровоза должен быть меньше одного градуса. Основной гипотезой настоящего исследования считается, что для обеспечения такого дифферента нагрузки на каждый бэй должны быть примерно одинаковыми.

Методы и материалы

Предположим, что дифферент и продольную нагрузку судна определяют только весом контейнеров в бэе, в то время как позиция бэя на судне никак не влияет на мореходные характеристики судна. В таком случае масса груза в каждом бэе должна быть примерно одинаковой. Однако, поскольку все контейнеры характеризуются

случайным весом, нельзя сказать, что одинаковая нагрузка обеспечивается одинаковым количеством контейнеров (рис. 3).

№	Номер контейнера	Порт назначения	Вес, т
1	ABCD1	Порт Brown	12,83
2	ABCD2	Порт Red	21,30
3	ABCD3	Порт Yellow	15,87
4	ABCD4	Порт Green	11,10
5	ABCD5	Порт Yellow	5,94
6	ABCD6	Порт Yellow	9,72
7	ABCD7	Порт Green	9,62
8	ABCD8	Порт Green	5,16
9	ABCD9	Порт Green	10,00
10	ABCD10	Порт Red	24,05

Рис. 3. Пример списка контейнеров

Следовательно, для того, чтобы определить, какие контейнеры необходимо поместить в бэй, требуется определить средний вес контейнеров в одном бэе, после чего выполнить перебор всех контейнеров из списка до тех пор, пока их общая масса не станет максимально близка к среднему значению или их количество не превысит максимальную вместимость трюма.

Средняя загрузка одного бэя составляет:

$$\bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^M w_i}{N_{\text{трюм}}}$$

где w_i – вес i -го контейнера;

M – количество контейнеров, которое принято к перевозке;

$N_{\text{трюм}}$ – количество бэев судна.

Случайное распределение весов контейнеров может привести к тому, что не все контейнеры будут распределены по бэям. В таком случае необходимо найти бэй с минимальной загрузкой и поместить в него еще один контейнер. Этот шаг повторяется до тех пор, пока все контейнеры не будут погружены.

Результаты

Пример получаемых нагрузок на каждый бэй представлен на рис. 4. Как видно из рисунка, такой подход обеспечивает одинаковую весовую нагрузку на каждый бэй при различном количестве контейнеров. При этом в каждом бэе находится одинаковое соотношение контейнеров, следующих в различные порты.

Распределение контейнеров внутри каждого бэя является задачей следующего этапа. Методы, применяемые на дальнейших этапах, стремятся минимизировать количество непроизводительных движений, связанных с необходимостью перестановки контейнеров, мешающих достать целевой в определенном порту. Поскольку в каждом бэе содержится одинаковое соотношение контейнеров, следующих в различные порты, решение этой задачи потребует больших вычислительных мощностей.

Однако, трудоемкость составления плана бэя можно сократить, если в представленном выше алгоритме перед распределением контейнеров по бэям, выполнить сортировку контейнеров по портам

назначения. В таком случае количество бэев, в которых возможно смешение контейнеров, следующих в различные порты снизится с двенадцати до трех (рис. 5).

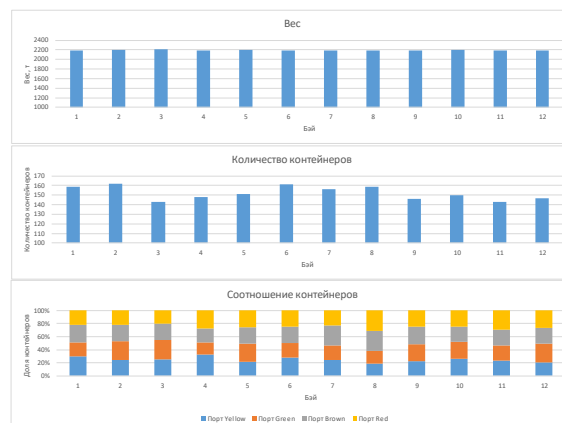


Рис. 4. Пример нагрузок на бэй

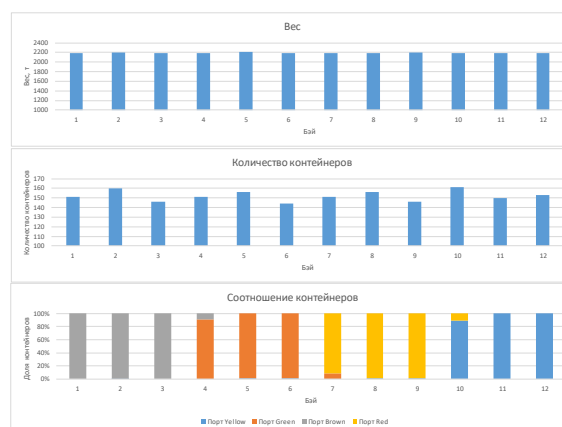


Рис. 5. Пример нагрузок на бэй при отсортированном списке

Обсуждение

В приведенном алгоритме в качестве основного критерия распределения контейнеров по бэям рассматривался общий вес контейнеров. Однако, для решения настоящей задачи необходимо приравнивать моменты бэев, которые определяются их позицией на судне. Кроме того, в моментах необходимо учитывать разную вместимость каждого бэя и массу судна.

Представленный метод удобен с точки зрения вычислений. Однако, он не рассматривает влияние количества контейнеров, которое должно быть погружено в следующем порту, на мореходность судна. В то же время, если в одном из портов, будут выгружены все контейнеры из нескольких бэев, но контейнеров к погрузке не будет принято, потребуются дополнительные перемещения контейнеров для обеспечения прочности судна. Эта проблема может быть устранена путем расположения контейнеров, следующих в один порт в каждый четный бэй.

Алгоритм может быть использован на начальных этапах составления грузового плана контейнеровоза, когда большая часть бэев судна пусты. Следующие

этапы алгоритма могут рассматривать различные стратегии размещения контейнеров внутри бэев.

Выводы

1. Особенности составления грузового плана контейнеровоза требует применения многоэтапного алгоритма, определяющего позицию контейнеров на судне с учетом его веса, размера, порта назначения, необходимости выборки контейнеров.

2. Первоначальное распределение контейнеров по бэям может быть выполнено исходя

из среднего веса, который может быть установлен в бэй.

3. Сортировка контейнеров по портам позволяет снизить количество дополнительных перемещений, связанных с необходимостью перемещения контейнеров, стоящих над целевыми, а также уменьшить трудоемкость вычислений.

4. Предложенный метод может быть использован для составления задания для алгоритмов составления грузового плана одного бэя.

Литература

1. Устинов А. В., Днепровский В. В. Анализ критериев составления грузового плана морского судна-контейнеровоза // ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». – 2005. – № 15-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-kriteriev-sostavleniya-gruzovogo-plana-morskogo-sudna-konteynerovoza> (дата обращения: 13.02.2023).
2. Москат Н. А., Алексеенко Е. А. Особенности разработки приложения для расчета и формирования карго-плана // ИВД. – 2019. – № 4 (55). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-razrabotki-prilozheniya-dlya-rascheta-i-formirovaniya-kargo-plana> (дата обращения: 13.02.2023).
3. Чуринов М. Ю. Посадка судна и её учет // Научные проблемы водного транспорта. – 2012. – № 32. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/posadka-sudna-i-eyo-uchet> (дата обращения: 13.02.2023).
4. Царик Р. С. Оценка влияния стандартного и фактического центров тяжести контейнера с типовым размещением груза на метacentрическую высоту контейнеровоза // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2021. – № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vliyaniya-standartnogo-i-fakticheskogo-tsentrov-tyazhesti-konteynera-s-tipovym-razmescheniem-gruza-na-metatsentricheskuyu> (дата обращения: 13.02.2023).
5. Царик Р. С., Акмайкин Д. А. Разработка алгоритма формирования контейнерного штабеля для обеспечения требуемой видимости с ходового мостика контейнеровоза // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2016. – № 4(38). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-algoritma-formirovaniya-konteynernogo-shtabelya-dlya-obespecheniya-trebuemoj-vidimosti-s-hodovogo-mostika-konteynerovoza> (дата обращения: 13.02.2023).
6. Бабуринов В. А. Качество технологического процесса и пропускная способность портов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2011. – № 3 (11). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kachestvo-tehnologicheskogo-protsessa-i-propusknaya-sposobnost-portov> (дата обращения: 13.02.2023).
7. Кузнецов А. Л., Кириченко А. В., Соляков О. В., Семёнов А. Д. Морские контейнерные перевозки : Монография. – М.: Моркнига, 2019.
8. Aleksandra Korach, Berit Dangaard Brouer, Rune Møller Jensen. Matheuristics for slot planning of container vessel bays. *European Journal of Operational Research*. Volume 282, Issue 3, 1 May 2020, Pages 873-885. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.09.04.
9. Consuelo Parreño-Torres, Hatice Çalık, Ramon Alvarez-Valdes, Rubén Ruiz. Solving the generalized multi-port container stowage planning problem by a matheuristic algorithm. *Computers & Operations Research*. Volume 133, September 2021, 105383. DOI: 10.1016/j.cor.2021.105383.
10. Ding Ding, Mabel C. Chou. Stowage planning for container ships: A heuristic algorithm to reduce the number of shifts. *European Journal of Operational Research*. Volume 246, Issue 1, 1 October 2015, Pages 242-249. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.03.044.

References

1. Ustinov A. V., Dneprovskij V. V. Analiz kriteriev sostavleniya gruzovogo plana morskogo sudna-konteynerovoza [Analysis of criteria for creation of containerships' bay plan] // GVUZ «Priazovskij gosudarstvennyj tehniceskij universitet». – 2005. – № 15-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-kriteriev-sostavleniya-gruzovogo-plana-morskogo-sudna-konteynerovoza> (data obraschenija: 13.02.2023).
2. Moskat N. A., Alekseenko E. A. Osobennosti razrabotki prilozhenija dlja rascheta i formirovaniya kargo-plana [The aspects of application development for calculations and compilation of cargo plan] // IVD. – 2019. – № 4 (55). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-razrabotki-prilozheniya-dlya-rascheta-i-formirovaniya-kargo-plana> (data obraschenija: 13.02.2023).
3. Churin M. Ju. Posadka sudna i ee uchet [Draught of the vessel and its accounting] // Nauchnye problemy vodnogo transporta. – 2012. – № 32. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/posadka-sudna-i-eyo-uchet> (data obraschenija: 13.02.2023).
4. Tsarik R. S. Otsenka vlijaniya standartnogo i fakticheskogo tsentrov tjazhesti kontejnera s tipovym razmescheniem gruzna na metatsentricheskuyu vysotu kontejnerovoza [Evaluating the influence of the standard and actual centers of gravity of the typically loaded container on the metacentric height of a container ship] // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova. – 2021. – № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vliyaniya-standartnogo-i-fakticheskogo-tsentrov-tyazhesti-konteynera-s-tipovym-razmescheniem-gruza-na-metatsentricheskuyu> (data obraschenija: 13.02.2023).

5. Tsarik R. S., Akmajkin D. A. Razrabotka algoritma formirovaniya kontejnernogo shtabelja dlja obespechenija trebuemoj vidimosti s hodovogo mostika kontejnerovoza [Development of container stack forming algorithm for ensuring of required visibility from navigation bridge of container ship] // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova. – 2016. – № 4(38). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-algoritma-formirovaniya-kontejnernogo-shtabelya-dlya-obespecheniya-trebuemoj-vidimosti-s-hodovogo-mostika-kontejnerovoza> (data obraschenija: 13.02.2023).
6. Baburin V. A. Kachestvo tehnologicheskogo protsessa i propusknaja sposobnost' portov [The quality of technology process and capacity of the ports] // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova. – 2011. – № 3 (11). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kachestvo-tehnologicheskogo-protsessa-i-propusknaya-sposobnost-portov> (data obraschenija: 13.02.2023).
7. Kuznetsov A. L., Kirichenko A. V., Soljakov O. V., Semenov A. D. Morskie kontejnerye perevozki: Monografija. [Maritime container shipping: monography] – М.: Morkniga, 2019.
8. Aleksandra Korach, Berit Dangaard Brouer, Rune Møller Jensen. Matheuristics for slot planning of container vessel bays. European Journal of Operational Research. Volume 282, Issue 3, 1 May 2020, Pages 873-885. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.09.04.
9. Consuelo Parreño-Torres, Hatice Çalık, Ramon Alvarez-Valdes, Rubén Ruiz. Solving the generalized multi-port container stowage planning problem by a matheuristic algorithm. Computers & Operations Research. Volume 133, September 2021, 105383. DOI: 10.1016/j.cor.2021.105383.
10. Ding Ding, Mabel C. Chou. Stowage planning for container ships: A heuristic algorithm to reduce the number of shifts. European Journal of Operational Research. Volume 246, Issue 1, 1 October 2015, Pages 242-249. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.03.044.

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 Львович Кузнецов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры портов и грузовых терминалов, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Aleksandr L. Kuznetsov, professor, Dr. Sci. (Eng), Professor of the Department of Ports and Cargo Terminals, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Александр Викторович Кириченко, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры портов и грузовых терминалов, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: KirichenkoV@gumrf.ru

Aleksandr V. Kirichenko, professor, Dr. Sci. (Eng), Head of the Department of Ports and Cargo Terminals, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: KirichenkoAV@gumrf.ru

Антон Денисович Семенов, аспирант, научный руководитель – Кузнецов Александр Львович, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: asemyonov054@gmail.com

Anton D. Semenov, postgraduate, scientific advisor – Kuznetsov Aleksandr L., Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: asemyonov054@gmail.com

Адам Михайлович Сампиев, кандидат экономических наук, директор по производству, АО «ЛЕНМРОНИИПРОЕКТ», 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Межевой канал, д. 3, корп. 2, e-mail: adam.sampiev@lenmor.ru

Adam M. Sampiev, PhD (Econ), operational manager, JSC «LENMORNIIPROEKT», 3/2 Mezhevoy kanal, St. Petersburg, 198035, Russian Federation; e-mail: adam.sampiev@lenmor.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.01.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.01.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 25.01.2023.

Научная статья

УДК 656.6; 656.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.029>

Анализ тенденций перевозки нефтеналивных грузов через морские порты Российской Федерации

А.Г. Котенко¹ algenko@gmail.com,

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. В статье проводится анализ современных тенденций развития перевозок нефтеналивных грузов морским, железнодорожным и трубопроводным видами транспорта. Особое внимание уделяется изменениям, происходящим на железнодорожном и трубопроводном транспорте, как наиболее тесным партнерам и конкурентам морского вида транспорта. При этом отмечается устойчивость тенденций, направленных на усиление партнерства в рамках российского перевозочного рынка нефтеналивных грузов, которое обеспечивается за счет закрепления рыночных сегментов и участников рынка за видами транспорта. В качестве определяющих факторов деления рынка указываются: различная степень инерционности при изменении объемов поставок при использовании разных видов транспорта, влияние финансовых соглашений, неравномерность потребления, географические особенности перевозок. Проведенное автором исследование, охватывающее различные возможности транспортировки нефтеналивных грузов, показало, что основная причина ухода части груза с морского транспорта и железных дорог связано с поступательным развитием системы магистральных трубопроводов при фактическом отсутствии у морского и железнодорожного транспорта возможности конкурировать по цене с трубопроводным транспортом ввиду регуляторных ограничений. Кроме того, на данный процесс влияют такие технологические преимущества трубопроводного транспорта, как высокая пропускная способность, автоматизация процессов налива, перекачки и слива, а также минимизация потери груза.

Ключевые слова: морской транспорт, нефть, нефтепродукты, перевозка, трубопроводный транспорт, нефтеналивные грузы, железнодорожный транспорт, морские порты

Для цитирования: Котенко А.Г., Анализ тенденций перевозки нефтеналивных грузов через морские порты Российской Федерации // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 224—229. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.029

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.029>

Analysis of trends in oil cargo transportation through seaports of the Russian Federation

Aleksey G. Kotenko¹ algenko@gmail.com

¹Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences

Abstract. The article analyzes current trends in the development of transportation of oil cargoes by sea, rail and pipeline modes of transport. Particular attention is paid to the changes taking place in the railway and pipeline transport, as the closest partners and competitors of the maritime mode of transport. At the same time, there is a stability of trends aimed at strengthening partnerships within the Russian transportation market for oil cargo, which is ensured by assigning market segments and market participants to modes of transport. The following factors are indicated as determining factors for dividing the market: a different degree of inertia when changing the volume of supplies when using different modes of transport, the impact of financial agreements, uneven consumption, geographical features of transportation. A study conducted by the author, covering various possibilities for transporting oil cargoes, showed that the main reason for the departure of part of the cargo from sea transport and railways is associated with the progressive development of the system of main pipelines, while sea and railway transport are virtually unable to compete on price with pipeline transport due to regulatory restrictions. In addition, this process is influenced by such technological advantages of pipeline transport as high throughput, automation of loading, pumping and unloading processes, as well as minimizing cargo loss.

Key words: maritime transport, oil, petroleum products, transportation, pipeline transport, oil cargo, rail transport, seaports

For citation: Aleksey G. Kotenko Analysis of trends in oil cargo transportation through seaports of the Russian Federation // Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 224—229. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.029

Введение

Анализ особенностей грузопотока сырьевой продукции показывает, что темп роста объемов морских грузоперевозок начал снижаться. Если в период с 2010 г. по 2014 г. ежегодно товароборот на морском транспорте увеличивался почти на 5%, то в

настоящее время прирост составляет около 2%. Тем не менее, тенденцией современных морских грузоперевозок является увеличение спроса на танкерные суда почти на 5%. Эксперты связывают её с падением цен на нефть и увеличением на неё спроса. Количество танкеров и их доля в составе мирового торгового флота соответствует темпам

добычи нефти и усилению её роли в качестве энергоносителя в промышленном производстве. Почти 40 % судов мирового флота — это танкеры, занимающиеся перевозкой нефти и нефтепродуктов. И несмотря на развитие других видов транспорта, в частности, трубопроводного, морская транспортировка нефти (около 25 % от всех товаров, перевозимых по морю) по-прежнему остается актуальной. Вместе с тем, изменения, происходящие на таких видах транспорта, как трубопроводный и железнодорожный, продолжают оказывать существенное влияние на морские перевозки нефтеналивных грузов.

Тенденции изменения перевозимых объемов нефтеналива на железнодорожном и трубопроводном транспорте

Железнодорожная сеть и трубопровод уже давно не ведут конкурентных войн за сырую нефть и нефтепродукты. Более того, участники рынка только выигрывают от использования этих двух видов транспорта [1].

В 2021 г. по данным Росстата в целом добыча нефти и природного газа выросла к 2020 г. на 2,7%. По данным ЦДУ ТЭК, добыча нефти (с учетом

газового конденсата) в 2021 г. составила 524,5 млн т, что на 2,2% выше показателя добычи предыдущего года, а переработка нефти выросла на 3,9% [4].

В общей погрузке грузов железными дорогами нефть и нефтепродукты, вследствие отнесения их к III тарифному классу (согласно Тарифному руководству No 4 Прейскурант 10–01) – высокодоходным грузам (сокращение доли данной группы грузов в общей структуре отгрузки приводит к падению доходности железнодорожных перевозок в целом [5]), являются важнейшей номенклатурой.

Доля нефти и нефтепродуктов в 2020 г. составляла 16,8%, а по итогам 2021 г. она подросла до 17,0%. Впрочем, в долгосрочной перспективе эта доля снижается: в 2001–2015 гг. она превышала 20%, но начиная с 2016 г. эта доля уже не составляла выше 20%. По данным СРО СОЖТ – Союза операторов железнодорожного транспорта [6], рассматривая погрузку нефти и нефтепродуктов на фоне двух предыдущих лет, можно констатировать, что погрузка железнодорожным транспортом этого вида грузов в 2021 г. составила 217,5 млн т, что выше показателя предыдущего года на 4,2%, или на 8,7 млн т (см. рис. 1).

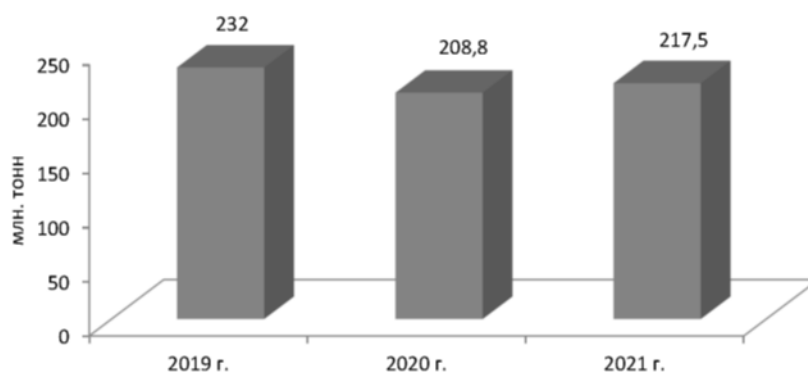


Рис. 1. Погрузка нефти и нефтепродуктов по сети РЖД в 2021 г. в сравнении с 2019 и 2020 гг. (млн тонн)

Текущее распределение перевозок сырой нефти между железнодорожным и трубопроводными видами транспорта в России говорит о явном доминировании трубопроводного: в 2021 году объем транспортировки сырой нефти по системе магистральных трубопроводов ПАО «Транснефть» составил 449,7 млн т (поставки внутри страны – 247,9 млн т (+6,0% к 2020 г.), экспорт – 201,8 млн т (-3,2%), а объем перевозок по сети РЖД – 12,8 млн т. При этом объем перевозок сырой нефти железнодорожным транспортом в 2010–2021 гг. сократился в 4,7 раза.

Основной объем нефтепродуктов (порядка 70%) перевозят железные дороги. При перевозках дизельного топлива на текущий момент у ОАО «РЖД» и ПАО «Транснефть» наблюдаются сопоставимые объемы – 44 и 34,4 млн т соответственно. Однако тенденция к сокращению перевозок по сети РЖД видна и здесь: в 2021 году по сравнению с пиковым 2012-м сокращение составило 24%. И фактором, сдерживающим рост погрузки нефтеналивных грузов на железную дорогу, остается увеличение отгрузки

нефтепроводами, например, объем поставок авиационного керосина по трубе увеличился на 35,3% или на 0,6 млн тонн и достиг 2,3 млн тонн, поставки автомобильного бензина увеличились на 15,8% или на 0,3 млн тонн и достигли 2,2 млн тонн [2].

Как видно из таблицы 1, экспортная ориентация нефтяной отрасли остается стабильной: доля экспорта находится на уровне 42%, что чуть ниже, чем в 2020 г. (на 1,6 п.п.).

При этом по состоянию на декабрь 2021 г. общий парк цистерн на сети РЖД составил 252,0 тыс. ед., что выше показателя декабря 2020 г. на 1,2%, или на 2,9 тыс. ед. Рабочий парк цистерн составил в декабре 2021 г. 228,7 тыс. ед., он уменьшился на 1,6% (на 3,6 тыс. ед.) по сравнению с декабрем 2020 г. [7].

Вместе с тем и здесь есть свои тонкости. Так, например, в августе 2021 г. нефтегрузы стали одним из драйверов прироста сетевой погрузки РЖД, что выглядело несколько необычно по сравнению с предыдущим периодом на сети, когда данная номенклатура тянула вниз [3].

Таблица 1

**Погрузка нефти и нефтепродуктов по сети РЖД, в том числе
во внутригосударственном сообщении (по РФ) и на экспорт**

	Погрузка, тыс. т			2021 г. к 2020 г.		Справочно: 2021 г. к 2019 г.	
	12 мес. 2019 г.	12 мес. 2020 г.	12 мес. 2021 г.	% 2021 г. к 2020 г.	2021 г. к 2020 г. +/-, тыс.	% 2021 г. к 2019 г.	2021 г. к 2019 г. +/-, тыс. т
Погружено всего	232 007,7	208 823,2	217 508,6	104,2%	+8 685,4	93,8%	-14 499,1
в том числе							
по РФ	98 079,4	91 015,8	91 432,0	100,5%	+416,3	93,2%	-6 647,3
на экспорт	133 928,3	117 807,4	126 076,6	107,0%	+8 269,2	94,1%	-7 851,7
Справочно: доля экспорта	42,3%	43,6%	42,0%				

**Факторы, определяющие тенденции перевозок
нефтеналивных грузов**

Погрузка нефти и нефтепродуктов в августе 2021 года выросла до 18,2 млн т, что на 7,1% больше, чем за аналогичный период 2020-го. При этом следует отметить, что внутренние перевозки нефтегрузов сократились, а экспорт, наоборот, вырос – на 11,9%. Необычным стал тот факт, что заметную долю прироста экспорта в указанный период обеспечили поставки сырья. По данным информационно-справочного портала «Железнодорожные перевозки», перевозки за рубеж нефти выросли на 19,4%. При этом внутри РФ ее перевозили существенно меньше. Эксперты это объясняют открывшейся возможностью в августе вывозить нефти на экспорт на спотовый рынок чуть больше, чем в предыдущий период благодаря смягчению политики в рамках сделки ОПЕК+. Причем данный тренд оказался не кратковременным: по данным аналитиков Clarkson Research Services, морские перевозки танкерами не повысили ставки фрахта из-за достаточно сбалансированного спроса на такие перевозки. Однако уже в октябре ставки выросли из-за разогревающегося спроса на танкеры – под влиянием новостей о снижении накопленных в морских портах запасов нефти. При волатильной ситуации на спотовые ставки дополнительные объемы сырья из РФ обычно вывозят на терминалы не по трубе, а по РЖД. Такие поставки закрывают точечные потребности на рынке. В дальнейшем при стабилизации грузопотоков прибавка в экспорте формируется за счет трубопроводного транспорта, а не железных дорог.

Еще один фактор, повлиявший на рост экспорта в августе 2021 г. по железным дорогам, – увеличение отправок бензина за рубеж на 5,6%. Особое беспокойство при этом вызвало снижение перевозок бензина внутри РФ на 0,2%. Поскольку это происходило на фоне известия о необходимости увеличения вывоза на ремонты в IV квартале НПЗ в связи с модернизацией установок первичной и вторичной переработки. Это привело к росту цен на бензин на внутреннем рынке и ответным мерам регуляторов. По данным ЦДУ ТЭК, общая потеря

мощностей в результате ремонтных работ на российских НПЗ в IV квартале составила 6,4 млн т по сравнению с III кварталом (11,7 млн т). По данным агентства Argus, наиболее масштабные ремонтные работы проводились на заводах «Роснефти», а также на заводах «Газпром нефти» и «Лукойла».

Несомненным драйвером сетевой погрузки стало увеличение экспорта керосина. Его перевозки по РЖД за рубеж, по данным ИСП «Железнодорожные перевозки», увеличились на 12,2%. Причем это происходило на фоне роста и внутренних отправок на 15,1%.

Керосиновый вираж стал следствием оживления авиаперевозок. В частности, в августе пассажирские авиаперевозки в России в августе, по подсчетам Росавиации, выросли почти на 50%. Соответственно это стимулировало рост перевозок по РЖД. Увеличились на железнодорожной сети и экспортные перевозки масел и минеральных смазок почти в 1,7 раза. Вывоз за рубеж прочих светлых нефтепродуктов вырос на 2,7%. Однако их больше отправляли и по трубе: на НПЗ поступило в более чем 1,3 раза больше прочих светлых нефтепродуктов для переработки. В основном речь идет о нефти.

Что касается темных нефтепродуктов, то здесь ситуация в августе 2021 г. для РЖД сложилась неоднозначная: в частности, экспорт мазута увеличился на 20,6%. Это было связано с тем, что на европейском рынке мазут, как и уголь, вынужден восполнять нехватку электричества с резким оживлением экономики после снятия части пандемийных ограничений. Пока газа в топливной генерации для этого недостаточно. Это чувствуется и в РФ, где на ТЭС активно запасают топливо на зиму и готовятся к началу более раннего периодического протапливания в ряде регионов, поскольку там ожидается похолодание. Как следствие – рост внутренних перевозок мазута на 10%. А вот экспорт битума в августе по РЖД, наоборот, сократился на 20,1%. Причины малопонятны. Но такой расклад пошел на пользу внутреннему рынку и способствовал активизации ремонта автодорог. Соответственно внутренние перевозки битума увеличились на 2,6%. Аналогичная картина наблюдалась по перевозкам

прочих темных нефтепродуктов: -17,9% – экспорт, +16% – внутренние перевозки [3].

На рынке предоставления подвижного состава в сегменте перевозок нефтеналивных грузов доминирует 6–7 крупных операторов, в числе которых: ООО «Трансойл», ООО «БалтТрансСервис», АО «Нефтетранссервис», ООО «Совфракт» и АО «ФГК».

На долю приведенных компаний приходится порядка 70% всего объема перевозок

нефтепродуктов производства Российской Федерации. Чуть более 15% рынка приходится на долю кэптивных операторов — дочерних структур вертикально интегрированных нефтяных компаний, в их число входят: АО «РН-Транс», ООО «Газпромтранс», АО «Лукойл-транс» и АО «Сибур-Транс». Оставшиеся 15% рынка приходится на небольшие независимые операторские и лизинговые компании (свыше 100 представителей).

Таблица 2

Крупнейшие собственники железнодорожных цистерн в РФ [11]

Компания-оператор	Парк в управлении, ед.	Доля рынка по объему перевозки, %
ООО «Трансойл»	49 634	30,01
АО «Нефтетранссервис»	35 467	9,42
ООО «Рейлго»	27 803	10,27
АО «ПГК»*	16 753	6,61
ООО «БалтТрансСервис»	13 678	9,70
ООО «Совфракт»	11 310	3,70
АО «ФГК»	7 453	2,20
Итого	162 098	71,91

Указанная структура рынка с небольшими изменениями сохраняется с начала 2018 года, когда небольшие игроки рынка стали объединяться в связи с необходимостью конкурировать с более крупными компаниями за право организовывать поставки нефтепродуктов не только с нефтебаз и наливных пунктов, но и с НПЗ.

Ярким примером является образование ООО «Рейлго» вследствие слияния ООО «ИСР», обслуживающего небольшие наливные пункты и нефтебазы и ООО «ОТЭКО», сдававшего парк в аренду. Объединенная структура вошла в список крупнейших операторов на рынке и с начала 2019 года стала одним из операторов Орского, Антипинского и Марийского НПЗ (совокупная грузовая база более 10 млн. тонн нефтепродуктов в год). Таким образом, компания обеспечила себя стабильной грузовой базой на среднесрочную перспективу и существенно расширила географию присутствия, что способствует выстраиванию наиболее оптимальных логистических схем и сокращению непроизводительного порожнего пробега вагонов. Указанные обстоятельства свидетельствуют о том, что рынок предоставления железнодорожного подвижного состава в сегменте нефтеналивных грузов за последние несколько лет сменил вектор развития, если раньше (до 2018 года) рынок тяготел к развитию конкуренции и из рынка монополистической конкуренции (текущей рыночной структуры) постепенно стремился к модели совершенной конкуренции, то в настоящее время, под влиянием описанных факторов, можно наблюдать его постепенную трансформацию в олигополию [12].

В целом на рынке прослеживается тенденция к консолидации парка для удержания позиций и сохранения повышенной доходности перевозок на направлениях, где уровень конкуренции

альтернативных видов транспорта незначителен или отсутствует [10].

Несмотря на то, что перевозки грузевых контейнеров в 2021 г. выросли на 16,6% к предыдущему году и составили, по данным ОАО «РЖД», более 4,6 млн TEU, по нефти и нефтепродуктам зафиксировано снижение объемов перевозок в контейнерах [8].

Средняя дальность перевозок всех грузов в 2021 г. составила 1880 км, что на 0,9% выше, чем в 2020 г. Любопытно отметить, что средняя дальность перевозки (в целом во всех видах сообщения) таких массовых сырьевых грузов, как нефтеналивные, немного снизилась – на 3,6%.

В течение 2021 г. одной из самых обсуждаемых в транспортных СМИ тем стала ситуация с динамикой ставок аренды вагонов и ставок оперирования вагонами. Такой кумулятивный измеритель, как средняя арендная ставка по шести родам подвижного состава (полувагон, цистерна (ТНП, СНП), крытый вагон, платформа (фитинговая, универсальная)), в течение года вырос с 1093 руб. за вагон в сутки в январе 2021 г. до 1317 руб. за вагон в сутки в декабре 2021 г. (рост на 20%). Суточная ставка аренды цистерны для нефтепродуктов в декабре 2021 г. составила 1175 руб. (+34% к декабрю 2020 г.). Вместе с тем анализ показывает, что в целом демонополизация рынка предоставления вагонов привела к снижению тарифной нагрузки на грузоотправителей. Если бы вместо рынка со множеством независимых операторов (собственников) грузовых вагонов это был единый парк, предоставляемый по регулируемым ценам, то, экстраполируя на этот сегмент динамику индексации тарифов РЖД, получим, что, например, в декабре 2021 г. ставка аренды была бы на 48% выше. Это наглядно демонстрирует величину выигрыша грузоотправителей, полученную ими вследствие того, что вместо единого парка МПС, работающего по

регулируемым ценам, на рынке работают вагоны различных операторов подвижного состава по рыночным ценам [9].

Заключение

Резюмируя, можно отметить следующее: основная причина ухода груза с морского транспорта и железных дорог – поступательное развитие системы магистральных трубопроводов при фактическом отсутствии у морского и железнодорожного транспорта возможности конкурировать по цене с трубопроводным ввиду регуляторных ограничений. Кроме того, на данный процесс повлияли такие технологические преимущества трубопроводного транспорта, как высокая пропускная способность, автоматизация процессов налива, перекачки и слива, а также минимизация потери груза.

Вместе с тем при транспортировке нефтеналивных грузов по трубе может снижаться их качество за счет смешивания продукции разных производителей, в то время, как и морской и, в особенности, железнодорожный транспорт позволяет сохранить качество груза каждого производителя неизменным. Конкурентным преимуществом морского транспорта является возможность доставки в труднодоступные районы, железнодорожного транспорта – большая разветвленность сети железных дорог по сравнению с системой магистральных нефтепродуктопроводов. Кроме того, железнодорожный транспорт позволяет транспортировать практически всю номенклатуру нефтепродуктов, а также организовывать перевозки небольших партий грузов.

Литература

1. Труба vs цистерна: кто заработает на транспортировке нефти и нефтепродуктов (интервью А. Алешиной с Д. Нарезным, рук. отдела комплексных исследований ИПЕМ) // РЖД-партнер, 29.06.2021. URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/interview/truba-vs-tsisterna-kto-zarabotaet-na-transportirovke-nefti-i-nefteproduktov/>
2. О поставке нефти и нефтепродуктов по системе ПАО «Транснефть» // Национальная ассоциация нефтегазового сервиса. URL: <https://nangs.org/news/midstream/pipelines/o-postavke-nefti-i-nefteproduktov-po-sisteme-pao-transneft?ysclid=lcsm1dfn49589768247>.
3. Экспорт нефтегрузов на РЖД в августе 2021 г. увеличился на 11,9% // РЖД-партнер, 13.09.2021. URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/eksport-neftegruzov-na-rzhd-v-avguste-2021-goda-velichilsya-na-11-9/?ysclid=lcsormmoq7397797094>.
4. Добыча нефти // ТЭК России. – 2021. – № 10. – С. 54–60.
5. АРГУС — Нефтетранспорт: информационно-аналитическое издание / под ред. О. А. Кирсанова.— М.: Argus media, 2019.— 85 с.
6. Объем работы грузового железнодорожного транспорта за 12 месяцев 2021 г. // Союза операторов железнодорожного транспорта. URL: <http://www.railsovet.ru/upload/iblock>
7. Отчет ф. 9д-3, сайт ОАО «РЖД», раздел «Раскрытие информации». URL: <https://company.rzd.ru/ru/9388>
8. Пресс-релиз ОАО «РЖД» от 11 января 2022 г. «Перевозки контейнеров по сети РЖД превысили 6,5 млн ДФЭ в 2021 году». URL: <https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=269852>
9. Хусаинов Ф.И. Рынок железнодорожных грузовых перевозок в 2021 г. // Экономика железных дорог. – 2022. – № 5. – С. 68–83
10. Егоров Ю.В. Уровень железнодорожных тарифов как фактор конкурентоспособности железнодорожного транспорта // Развитие экономической науки на транспорте: устойчивость развития железнодорожного транспорта: сборник докладов IV Международной научно-практической конференции. — Санкт-Петербург, 2020 г.
11. Руденко Е.В., Лякина М.А. Тарифообразующие факторы на рынке железнодорожных перевозок нефти и нефтеналивных грузов // Актуальные вопросы экономики транспорта высоких скоростей: сборник работ международной научно-практической конференции. — Санкт-Петербург, 2020 г.
12. Житинев П.Ю., Журавлева Н.А. Анализ влияния постпандемийного кризиса на рынок железнодорожных перевозок нефтеналивных грузов // Экономические науки. – 2020. – № 8 (189). – С. 28–36.

References

1. Pipe vs tank: who will earn money on the transportation of oil and petroleum products (interview by A. Alyoshina with D. Narezny, ruk. department of Integrated Research of IPPEM) // RZD-partner, 06/29/2021. URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/interview/truba-vs-tsisterna-kto-zarabotaet-na-transportirovke-nefti-i-nefteproduktov/>
2. On the supply of oil and petroleum products through the system of PJSC "Transneft" // National Association of Oil and Gas Service. URL: <https://nangs.org/news/midstream/pipelines/o-postavke-nefti-i-nefteproduktov-po-sisteme-pao-transneft?ysclid=lcsm1dfn49589768247>
3. Export of oil cargo to Russian Railways in August 2021 increased by 11.9% // Russian Railways-partner, 13.09.2021. URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/eksport-neftegruzov-na-rzhd-v-avguste-2021-goda-velichilsya-na-11-9/?ysclid=lcsormmoq7397797094>
4. Oil production // Fuel and Energy Complex of Russia. – 2021. – No. 10. – pp. 54-60.
5. ARGUS — Oil transport: information and analytical edition / edited by O. A. Kirsanov.— M.: Argus media, 2019.— 85 p.
6. The volume of work of freight rail transport for 12 months of 2021 // Union of Railway Transport Operators. URL: <http://www.railsovet.ru/upload/iblock>

7. Report f. 9d-3, website of JSC "Russian Railways", section "Disclosure of information". URL: <https://company.rzd.ru/ru/9388>
8. Press release of JSC "Russian Railways" dated January 11, 2022 "Container transportation on the Russian Railways network exceeded 6.5 million TEU in 2021." URL: <https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=269852>
9. Khusainov F.I. Railway freight transportation market in 2021 // Economics of railways. – 2022. – No. 5. – pp. 68-83
10. Egorov Yu.V. The level of railway tariffs as a factor of competitiveness of railway transport // Development of economic science in transport: sustainability of railway transport development: collection of reports IV International Scientific and Practical Conference. — Санкт-Петербург, 2020 г.
11. Руденко Е.В., Лякина М.А. Тарифообразующие факторы на рынке железнодорожных перевозок нефти и нефтеналивных грузов // Актуальные вопросы экономики транспорта высоких скоростей: сборник работ международной научно-практической конференции. — Санкт-Петербург, 2020 г.
12. Житинев П.Ю., Журавлева Н.А. Анализ влияния постпандемийного кризиса на рынок железнодорожных перевозок нефтеналивных грузов // Экономические науки. – 2020. – № 8 (189). – С. 28–36.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Геннадьевич Котенко, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией проблем организации транспортных систем, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: algenko@gmail.com

Aleksey G. Kotenko, Dr. Sci. (Eng), professor, Head of the Laboratory of the organization of transport systems, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 12-th Line VO, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: algenko@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.02.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 27.02.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 28.02.2023.

Научная статья

УДК 621.791.754:621.791.927

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.030>

Влияние импульсного режима наплавки на микроструктуру наплавленного металла при электродуговом выращивании (WAAM) тонкостенного элемента с использованием Al-Mg сплава

А.И. Куракин¹ kurakin@corp.smtu.ru, И. Г. Струков¹ struckov.i@gmail.com,

Е.И. Ефимов¹ boodoomber@yandex.ru, Я.П. Скобликов¹ iakov00p@yandex.ru, В.М. Карпов¹ clvr00@gmail.com

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В данной работе представлены исследования влияния параметров режима импульсно-дуговой наплавки на микроструктуру наплавленного металла, полученного интенсивно развивающимся в наши дни методом проволочно-электродугового выращивания (WAAM) с использованием проволоки марки Св-AMg5 в защитной среде аргона. Установлена зависимость влияния режима наплавки на относительный размер зерна и его форму. При увеличении частоты импульсов тока в диапазоне от 13 до 55 Гц средний условный размер зерна увеличивается от 98 до 236 мкм. Условный эксцентриситет зерна также увеличивается. Зависимость среднего условного размера зерна от погонной энергии не обнаружена. При увеличении погонной энергии замечено уменьшение эксцентриситета зерна. Зависимость твердости наплавленного металла от режима наплавки не замечена. Среднее значение твердости лежит в пределах 66-68 HV. Результаты работы рекомендуются использовать для выбора частоты импульсов (влияющих также на размер капель) при разработке технологий проволочно-дугового выращивания из алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: WAAM, микроструктура, эксцентриситет, импульсная наплавка, алюминий

Благодарности: Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, номер проекта 20-38-90288.

Для цитирования: Куракин А.И., Струков И.Г., Ефимов Е.И., Скобликов Я.П., Карпов В.М., Влияние импульсного режима наплавки на микроструктуру наплавленного металла при электродуговом выращивании (WAAM) тонкостенного элемента с использованием Al-Mg сплава, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 230—236. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.030

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.030>

Influence of the surfacing mode on the microstructure of the deposited metal produced by wire arc additive manufacturing using Al-Mg alloy

Artur I. Kurakin¹ kurakin@corp.smtu.ru, Ilya G. Strukov¹ struckov.i@gmail.com,

Evgeny I. Efimov¹ boodoomber@yandex.ru, Iakov P. Skoblikov¹ iakov00p@yandex.ru,

Vyacheslav M. Karpov¹ clvr00@gmail.com

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. This paper presents studies of the influence of the parameters of the pulsed arc surfacing mode on the microstructure of the deposited metal produced by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) using the Al-Mg alloy (AMg5 wire) with an argon gas-shield, which is being intensively developed today. The dependence of the influence of the surfacing mode on the relative size of the grain and its shape is established. With an increase in the frequency of current pulses in the range from 13 to 55 Hz, the average conditional grain size increases from 98 to 236 μm . The conditional grain eccentricity also increases. The dependence of the average conditional grain size on the heat input was not found. With an increase in heat input, a decrease in the grain eccentricity was observed. The dependence of the hardness of the deposited metal on the surfacing mode was not noticed. The average value of hardness lies in the range of 66-68 HV. The results of the work are recommended to be used to select the pulse frequency (which also affects the droplet size) in the development of technologies for wire-arc additive manufacturing from aluminum alloys.

Keywords: WAAM, surfacing, aluminium alloys, additive manufacturing, microstructure, grain

Acknowledgments: the authors are grateful to Russian foundation for basic research

Financial Support: The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90288

For citation: Artur I. Kurakin, Ilya G. Strukov, Evgeny I. Efimov, Iakov P. Skoblikov, Vyacheslav M. Karpov, Influence of the surfacing mode on the microstructure of the deposited metal produced by wire arc additive manufacturing using Al-Mg alloy, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 230—236. DOI:10.37220/MIT.2023.59.1.030

Введение

Аддитивные технологии производства являются эффективным способом изготовления деталей. По сравнению с традиционными технологиями производства, где материал удаляется из заготовки, аддитивные технологии основаны на послойном

добавлении материала к заготовке. Особую популярность аддитивное изготовление деталей получило при изготовлении мелкосерийной продукции в аэрокосмической и кораблестроительной отрасли производства.

Одной из перспективных технологий аддитивного производства является технология электродугового

выращивания, основанная на процессе MIG/MAG сварке. Эта технология предназначена для изготовления крупногабаритных изделий сложной геометрической формы.

Перспективным материалом для аэрокосмической и судостроительной промышленности являются различные алюминиевые сплавы. Наиболее востребованными при аддитивном выращивании являются не упрочняемые алюминиевые сплавы Al-Cu (2xxx), Al-Si (4xxx), Al-Mg (5xxx). Алюминиевые сплавы обладают коррозионной устойчивостью, низкой плотностью, высокой прочностью. [1]

При выращивании изделий электродуговым способом из сплавов на основе Al применяют технологии, позволяющие контролировать перенос металла в сварочную ванну и уменьшить тепловложение в основной металл. Одной из таких технологий является технология импульсно-дуговой наплавки. [2, 3].

Однако, при использовании различных импульсных режимов наплавки наплавленный металл изменяет свою структуру. Изменение погонной энергии в процессе наплавки влияет на дефектообразование, геометрические характеристики слоя, механические характеристики наплавленного металла. Ключевой особенностью микроstructures наплавленного металла при аддитивном выращивании является наличие зон с различным размером и формой зерен [4, 5, 6, 7].

В работе [8] было изучено влияние погонной энергии на микроstructure наплавленного металла при электродуговом выращивании с использованием Al-Mg проволоки и технологии СМТ. Уменьшение погонной энергии при наплавке приводит к измельчению зерна.

Увеличение скорости подачи проволоки влечет за собой уменьшение микротвердости наплавленного металла, однако при изменении скорости перемещения изменения микротвердости незначительно. Градиент изменения микротвердости от слоя к слою отсутствует при неизменном режиме наплавки.

В процессе электродугового выращивания с использованием проволоки из Al-Mg сплава, изменение погонной энергии влечет за собой изменение механических свойств наплавленного металла. Данное явление связано с тем, что с увеличением погонной энергии происходит выгорание Mg, как легирующего элемента [9, 10].

Влияние на микроstructure и механические свойства наплавленного металла может выполняться путем послойной механической обработки наплавленного металла [11, 12, 13].

Послойная механическая обработка наплавленного металла ведет к измельчению зерна, уменьшению пористости и увеличению предела прочности материала. Наиболее эффективно для уменьшения пористости и измельчения зерна использовать комбинацию послойной механической обработки с термической обработкой [14].

Оборудование и экспериментальная часть

В ходе работы была выполнена серия экспериментов с выращиванием тонкостенных элементов — стенок. Было определено влияние ключевых параметров режима наплавки на микроstructure наплавленного металла. В качестве факторов, влияющих на микроstructure металла при наплавке были выбраны следующие параметры: скорость наплавки (TS), сила тока (I), частота импульсов (f).

Наплавка выполнялась с использованием алюминиевой проволоки марки АМg5 диаметром 1,2 мм. Химический состав проволоки приведен в таблице 1. В качестве источника питания выступал Kemppi PSS 5000, модернизированный цифровым блоком управления импульсами сварочного тока. Процедура создания управляющих программ для реализации импульсно-дугового процесса с обеспечением заданных параметров описана в работах [15,16]. Регистрация и обработка электрических величин выполнялась в соответствии с [17].

Линейное перемещение сварочной горелки обеспечивалось установкой, представленной на рисунке 1.



Рис. 1. Установка для выполнения наплавки.

В ходе выполнения экспериментов были определены диапазоны технологических параметров в координатах WFS/TS, в рамках которых были выбраны режимы, обеспечивающие визуальное качественное формирование наплавленного металла, а также мелкокапельный перенос металла с диаметром капли 1,3-2 мм. Диаметр капли определялся с использованием скоростной видеосъемки. На рисунке 2 представлен кадр отрыва капли. При наплавке осуществлялся контроль температуры основного металла и в процессе выращивания поддерживался в пределах 55-60°C. Напряжение и сила тока являются интегральными значениями. Длительность импульса составляет 5 мс. Данные о режимах наплавки представлены в таблице 2.

Таблица 1

Химический состав проволоки АМg5 в %

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Be	Mg	Zn
До 0,4	До 0,4	0,5 -0,8	0,02 – 0,1	91,1 – 93,7	До 0,1	0,0002 – 0,005	5,8 – 6,8	До 0,2

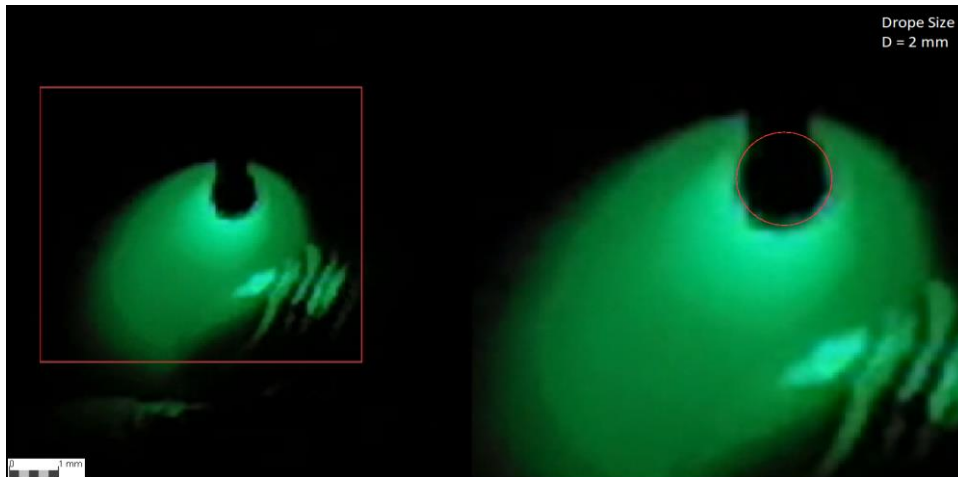


Рис. 2. Определение размера капли

Таблица 2

Режимы наплавки

№ Режима	I, А	U, В	f, Гц	V _{св} , см/мин	q, Дж/см
1	70	20	13	68	20,6
2	100	20,5	19	68	30,1
3	70	21	13	50	29,4
4	105	21	19	50	44,1
5	75	19,8	40	50	29,7
6	75	19,8	40	68	21,8
7	100	20,5	55	50	41
8	105	21	55	50	44,1



Рис. 3. Фотография микрошлифов

На каждом из приведенных режимов были выращены стенки высотой 30-50 мм. Для анализа микроструктуры были подготовлены образцы предварительно отполированные и протравленные в реактиве FeCl₃:HCl:H₂O смешанных в пропорции 1:6:3. На рисунке 3 представлено изображение микрошлифов для анализа.

Результаты

Анализ микроструктуры выполнялся с использованием микроскопа Neophot 32 и специализированного программного обеспечения. Оценка среднего условного размера зерна

выполнялось методом секущих. На рисунке 4 представлен пример измерения зернистости образца. Измерения выполнялись в трех типичных точках при таком увеличении, чтобы в поле зрения находилось целиком 80-200 зерен. Для измерений применялись секущие линии в виде трех непараллельных прямых пересекающие не менее 10 зерен, причем две из линий выполнялись строго перпендикулярно.

При аддитивном выращивании наплавленный металл имеет структуру с вытянутой формой зерна в направлении вектора выращивания, в сечении напоминающие эллипс. Принимая этот факт для

оценки формы зерна был выполнен расчет условного эксцентриситета зерна (ϵ). Расчет выполнялся по формуле 1:

$$\epsilon = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} \tag{1}$$

Таблица 3

Оценка формы и размера зерна

№ Режим	Средний условный размер зерна, мкм	Минимальный средний условный размер зерна (b), мкм	Максимальный средний условный размер зерна (a), мкм	Условный эксцентриситет зерна, ϵ
1	98	68	136	0,87
2	120	87	168	0,86
3	148	122	187	0,76
4	105	93	111	0,55
5	155	107	222	0,88
6	161	155	345	0,89
7	197	139	253	0,84
8	236	155	245	0,77

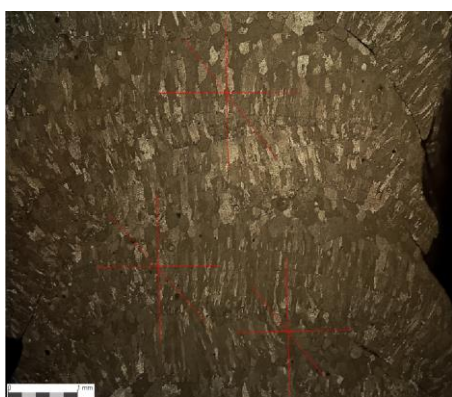


Рис. 4. Измерение условного размера зерна

Для расчета условного эксцентриситета были измерены максимальный и минимальный условный размер зерна. Для измерения этих характеристик использовались секущие линии, расположенные строго перпендикулярно относительно друг друга. Максимальный условный размер зерна (a) вычислялся как отношение длины секущей сонаправленной с вектором выращивания к числу границ зерен которая эта секущая пересекает. Минимальный условный размер зерна (b) вычисляется похожим образом. Единственным отличием является то, что в качестве секущей выступает линия перпендикулярная вектору выращивания. Для оценки формы зерна использовались средние значения размера зерна для трех измерений выполненных на одном образце. Результаты измерений и расчетов приведены в таблице 3.

В ходе работы по методу Виккерса была измерена микротвердость металла. Измерения выполнялись в 9 равноудаленных точках, расположенных в центральной части образца вдоль вектора выращивания на расстоянии 0,5 мм друг от друга. Разница между полученными значениями для каждого образца составляет 3-5 ед. Измерения выполнялись при усилии 1 кг. Время нагружения составляло 5 секунд. Для анализа использовались средние значения микротвердости.

По результатам измерений построен график распределения среднего условного размера зерна (L) в зависимости от режима наплавки (рисунк 5), а

также график распределения условного эксцентриситета (ϵ) зерна в зависимости от режима наплавки (рисунк 6).

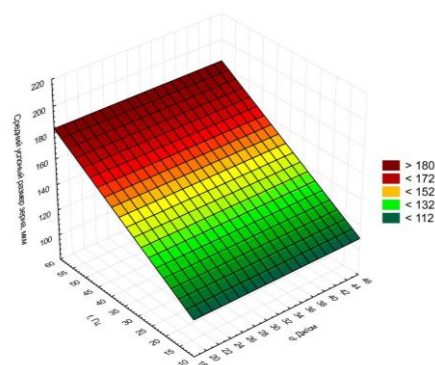


Рис. 5. График распределения среднего условного размера зерна в зависимости от режима наплавки

Проводя анализ данных о размере зерна можно сделать вывод, что средний условный размер зерна не зависит от погонной энергии. При увеличении частоты импульсов, средний условный размер зерна увеличивается. Это связано с тем, что при увеличении частоты импульсов увеличивается количество расплавленного металла, поступающего в сварочную ванну, что в свою очередь увеличивает ее объем и создает благоприятные условия для образование крупных зерен.

Проводя анализ данных о форме зерна, можно сделать вывод, что оба фактора, погонная энергия и частота импульсов, оказывают влияние на форму зерна. Формирование микроструктуры в слое напрямую связано с размером сварочной ванны, скоростью поступления присадочного, количеством вложенного тепла. В условиях аддитивного выращивания кристаллизующий металл подвержен разным степеням охлаждения по вектору выращивания и перпендикулярному к нему направлению. Этот факт влияет на форму зерна. При увеличении погонной энергии эксцентриситет зерна уменьшается. Это связано с тем, что основной металл насыщается теплом и тем самым обеспечивает более равномерное распределение степеней переохлаждения во всех направлениях.

Изменение частоты импульсов тока оказывает не меньшее влияние на условный эксцентриситет

зерна и позволяет управлять формой зерна при заданном режиме наплавки. При увеличении частоты импульсов на заданном режиме происходит увеличение условного эксцентриситета зерна. Это связано с тем, что при увеличении частоты импульсов сварочного тока, объем ванны расплавленного металла увеличивается. Увеличение объема расплавленного металла при постоянной погонной энергии приводит к неравномерному охлаждению зоны расплавленного металла, что приводит к образованию столбчатых зерен.

По результатам измерений микротвердости построен график зависимости микротвердости от режима наплавки (рисунок 7). Распределение твердости по слоям не замечено. Зависимость микротвердости наплавленного металла от режима наплавки не выявлена. Среднее значение микротвердости лежит в пределах 66-68 HV.

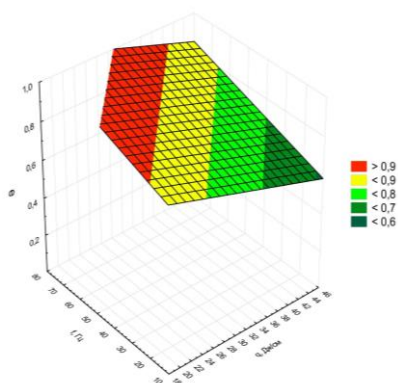


Рис. 6. График распределения условного эксцентриситета (ϵ) в зависимости от режима наплавки

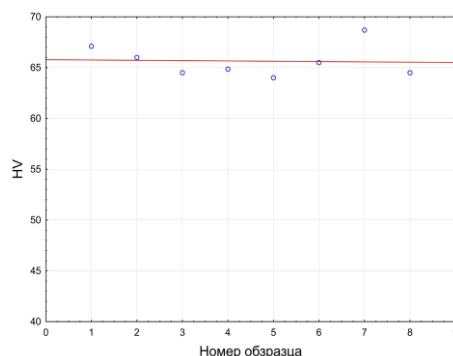


Рис. 7. График зависимости твердости от режима наплавки

Выводы

1. Средний условный размер зерна не зависит от погонной энергии.
2. При увеличении частоты импульсов тока средний условный размер зерна увеличивается.
3. При увеличении частоты импульсов тока при неизменной погонной энергии режима происходит увеличение условного эксцентриситета зерна.
4. При увеличении погонной энергии при заданной частоте импульсов сварочного тока величина условного эксцентриситета уменьшается.
5. Микротвердость наплавленного металла не изменяется от слоя к слою и не зависит от режима наплавки. Среднее значение микротвердости лежит в пределах 66-68 HV.

Литература

1. K.E.K. Vimal, M. Naveen Srinivas, Sonu Rajak, Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: A review, *Materials Today: Proceedings*. 41 (5) (2021) 1139-1145.
2. Luo Yi, Li Jinglong, Xu Jie, Zhu Liang, Han Jingtao, Zhang Chengyang, Influence of pulsed arc on the metal droplet deposited by projected transfer mode in wire-arc additive manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*. 259 (2018) 353-360.
3. Zhu Liang, Li Jinglong, Luo Yi, Han Jingtao, Zhang Chengyang, Xu Jie, Chen Dong, Characteristics of metal droplet transfer in wire-arc additive manufacturing of aluminum alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 99 (2018) 1521-1530.
4. E. Aldalur, A. Suarez, F. Veiga, Metal transfer modes for Wire Arc Additive Manufacturing Al-Mg alloys: Influence of heat input in microstructure and porosity, *Journal of Materials Processing Technology* 297 (2021) 117271
5. Nor Ana Rosli, Mohd Rizal Alkahari, Mohd Fadzli bin Abdollah, Shajahan Maidin, Faiz Redza Ramli, Safarudin Gazali Herawan, Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process, *Journal of Materials Research and Technology* 11 (2021) 2127-2145.
6. Yinghui Zhou, Xin Lin, Nan Kang, Weidong Huang, Jiang Wang, Zhennan Wang, Influence of travel speed on microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured 2219 aluminum alloy, *Journal of Materials Science & Technology* 37 (2020) 143-153
7. Leilei Wang, Jiayang Xue, Qiang Wang, Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel, *Materials Science and Engineering: 751* (2019) 183-190.
8. Chuanchu Su, Xizhang Chen, Chuang Gao, Yangfan Wang, Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Al-Mg alloys fabricated by WAAM, *Applied Surface Science* 486 (2019) 431-440
9. Tao Yuan, Zhanliang Yu, Shujun Chen, Min Xu, Xiaoqing Jiang, Loss of elemental Mg during wire + arc additive manufacturing of Al-Mg alloy and its effect on mechanical properties, *Journal of Manufacturing Processes* 49 (2020) 456-462.
10. Lingling Ren, Huimin Gu, Wei Wang, Shuai Wang, Chengde Li, Zhenbiao Wang, Yuchun Zhai, Peihua Ma, Effect of Mg Content on Microstructure and Properties of Al-Mg Alloy Produced by the Wire Arc Additive Manufacturing Method, *Additive Manufacturing: Alloy Design and Process Innovations* 12(24) (2019) 4160

11. Yinbao Tiana, Junqi Shena, Shengsun Hua, Ying Lianga, Pengfei Baia, Effects of ultrasonic peening treatment on surface quality of CMT-welds of Al alloys, *Journal of Materials Processing Technology* 254 (2018) 193-200.
12. Paul A. Colegrove Jack Donoghue Filomeno Martina Jianglong Gu Philip Prangnell Jan Hönnige, Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components, *Scripta Materialia* 135 (2017) 111-118
13. Jianglong Gua, Jialuo Ding, Stewart W. Williams, Huimin Gua, Peihua Maa, Yuchun Zhai, The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys, *Journal of Materials Processing Technology* 230 (2016) 26-34
14. Jianglong Gu, Shouliang Yang, Minjie Gao, Jing Bai, Yuchun Zhai, Jialuo Ding, Micropore evolution in additively manufactured aluminum alloys under heat treatment and inter-layer rolling, *Materials & Design* 186 (2020) 108288
15. Карпов В.М., Владимиров А.В., Мурзин В. В. Упрощенное программирование сварочных процессов на java-совместимом языке ввода команд XML // *Морские интеллектуальные технологии*, 2014. № 26. С. 84-91.
16. Технология цифрового синтеза импульсной сварки судовых конструкций из алюминиевых сплавов / В. М. Карпов [и др.] // *Морские интеллектуальные технологии*, 2014. № 3. С. 94-100.
17. Измерение и обработка физических величин для цифрового контроля сварки в судостроении / И. Г. Струков [и др.] // В книге: *Метрологическое обеспечение инновационных технологий. Международный форум. 2020. С. 94-95.*

References

1. K.E.K. Vimal, M. Naveen Srinivas, Sonu Rajak, Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: A review, *Materials Today: Proceedings*. 41 (5) (2021) 1139-1145.
2. Luo Yi, Li Jinglong, Xu Jie, Zhu Liang, Han Jingtao, Zhang Chengyang, Influence of pulsed arc on the metal droplet deposited by projected transfer mode in wire-arc additive manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*. 259 (2018) 353-360.
3. Zhu Liang, Li Jinglong, Luo Yi, Han Jingtao, Zhang Chengyang, Xu Jie, Chen Dong, Characteristics of metal droplet transfer in wire-arc additive manufacturing of aluminum alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 99 (2018) 1521–1530.
4. E. Aldalur, A. Suarez, F. Veiga, Metal transfer modes for Wire Arc Additive Manufacturing Al-Mg alloys: Influence of heat input in microstructure and porosity, *Journal of Materials Processing Technology* 297 (2021) 117271
5. Nor Ana Rosli, Mohd Rizal Alkahari, Mohd Fadzli bin Abdollah, Shajahan Maidin, Faiz Redza Ramli, Safarudin Gazali Herawan, Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process, *Journal of Materials Research and Technology* 11 (2021) 2127-2145.
6. Yinghui Zhou, Xin Lin, Nan Kang, Weidong Huang, Jiang Wang, Zhennan Wang, Influence of travel speed on microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured 2219 aluminum alloy, *Journal of Materials Science & Technology* 37 (2020) 143-153
7. Leilei Wang, Jiaxiang Xue, Qiang Wang, Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel, *Materials Science and Engineering: 751* (2019) 183-190.
8. Chuanchu Su, Xizhang Chen, Chuang Gao, Yangfan Wang, Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Al-Mg alloys fabricated by WAAM, *Applied Surface Science* 486 (2019) 431-440
9. Tao Yuan, Zhanliang Yu, Shujun Chen, Min Xu, Xiaoqing Jiang, Loss of elemental Mg during wire + arc additive manufacturing of Al-Mg alloy and its effect on mechanical properties, *Journal of Manufacturing Processes* 49 (2020) 456-462.
10. Lingling Ren, Huimin Gu, Wei Wang, Shuai Wang, Chengde Li, Zhenbiao Wang, Yuchun Zhai, Peihua Ma, Effect of Mg Content on Microstructure and Properties of Al–Mg Alloy Produced by the Wire Arc Additive Manufacturing Method, *Additive Manufacturing: Alloy Design and Process Innovations* 12(24) (2019) 4160
11. Yinbao Tiana, Junqi Shena, Shengsun Hua, Ying Lianga, Pengfei Baia, Effects of ultrasonic peening treatment on surface quality of CMT-welds of Al alloys, *Journal of Materials Processing Technology* 254 (2018) 193-200.
12. Paul A. Colegrove Jack Donoghue Filomeno Martina Jianglong Gu Philip Prangnell Jan Hönnige, Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components, *Scripta Materialia* 135 (2017) 111-118
13. Jianglong Gua, Jialuo Ding, Stewart W. Williams, Huimin Gua, Peihua Maa, Yuchun Zhai, The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys, *Journal of Materials Processing Technology* 230 (2016) 26-34
14. Jianglong Gu, Shouliang Yang, Minjie Gao, Jing Bai, Yuchun Zhai, Jialuo Ding, Micropore evolution in additively manufactured aluminum alloys under heat treatment and inter-layer rolling, *Materials & Design* 186 (2020) 108288
15. Karpov V.M., Vladimirov A.V., Murzin V. V. Uproshchennoe programmirovaniye svarochnykh processov na java-ovmestimom yazyke vvoda komand XML [Simplified programming of welding processes in a java-compatible XML command input language], *Morskie intellektual'nye tekhnologii* 26 (2014) 84-91.
16. Karpov V.M. et al Tekhnologiya cifrovogo sinteza impul'snoy svarki sudovykh konstrukcij iz alyuminievykh splavov [Technology of digital synthesis of pulsed welding of ship structures made of aluminum alloys], *Morskie intellektual'nye tekhnologii* 3 (2014) 94-100.
17. Strukov I.G. et al Izmerenie i obrabotka fizicheskikh velichin dlya cifrovogo kontrolya svarki v sudostroenii [Measurement and processing of physical quantities for digital welding control in shipbuilding], *Metrologicheskoe obespechenie innovacionnykh tekhnologii. Mezhdunarodnyj forum* (2020) 94-95.

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

Артур Ильич Куракин, старший преподаватель кафедры сварки судовых конструкций, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10-14, e-mail: kurakin@corp.smtu.ru

Илья Геннадьевич Струков, инженер кафедры сварки судовых конструкций, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10-14, e-mail: struckov.i@gmail.com

Яков Павлович Скобликов, магистрант кафедры сварки судовых конструкций, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10-14, e-mail: iakov00p@yandex.ru

Вячеслав Михайлович Карпов, старший преподаватель кафедры сварки судовых конструкций, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10-14, e-mail: clvr00@gmail.com

Евгений Игоревич Ефимов, старший преподаватель кафедры сварки судовых конструкций, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10-14, e-mail: boodoomber@yandex.ru

Artur I. Kurakin, Lecturer, Welding Of Ship Structures Department, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 10-14, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kurakin@corp.smtu.ru

Ilya G. Strukov, Engineer, Welding Of Ship Structures Department, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 10-14, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: struckov.i@gmail.com

Iakov P. Skoblikov, Master's student, Welding Of Ship Structures Department, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 10-14, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: iakov00p@yandex.ru

Vyacheslav M. Karpov, Lecturer, Welding Of Ship Structures Department, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 10-14, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: clvr00@gmail.com

Evgeny I. Efimov, Lecturer, Welding Of Ship Structures Department, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 10-14, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: boodoomber@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.11.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 22.12.2022.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

COMPUTER MODELING AND DESIGN AUTOMATION

Научная статья

УДК 629.2.081; 681.518.25

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.031>

Разработка физической модели процесса эксплуатации разноглубинного тралового комплекса

А.А. Недоступ¹ nedostup@klgtu.ru, **А.О. Ражев**¹ progacpp@live.ru, **П.В. Насенков**¹ pavel.nasenkov@klgtu.ru,
С.В. Дятченко¹ svd.ks@mail.ru, **В.В. Сысенко**¹ vladimirsyenko@hotmail.com, **Д.В. Аскарков**¹ 6lupi@bk.ru,
Е.И. Сергеев¹ pyrojaeger@gmail.com

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. В статье авторы представляют смоделированную физическую траловую конструкцию и промысловую палубу рыболовного судна по теории мультифизического подобия траловых конструкций. Проведены экспериментальные исследования процессов эксплуатации модели тралового комплекса в гидроканале ООО «Фишеринг Сервис». Получена качественная картина динамических процессов тралового комплекса. Проведена сравнительная оценка модели промысловой машины, при смоделированном тралении с предоставленной моделью трала N-MWT-m2 1,65/6,0 м. Теоретически и экспериментально доказано обоснованность замены имитационной дели (число ниток, веревок и узлов в элементе дели). Проанализирована маневренность тралового комплекса и рыболовного судна для прицельности тралового лова и выполнения других промысловых операций с учетом ваера, качки и волнения. Все это выполнено для полноценной разработки физической модели процесса эксплуатации разноглубинного тралового комплекса. Все расчетные характеристики предварительно сделанные, были проверены во время экспериментальных исследований в гидроканале ООО «Фишеринг-Сервис». Экспериментальные исследования проводились с моделью разноглубинного трала методом: система «модель трала - голые концы - кабели - лапки - траловые доски - ваера». В ходе проведения экспериментов были получены геометрические и силовые параметры физической модели процесса эксплуатации разноглубинного тралового комплекса N-MWT-m2 1,65/6,0 м. Применено оборудование: пульт управления потоком воды в гидроканале; вертушка для измерения скорости потока воды: тензометрический комплекс MIC-200; миллиамперметр Ц4311; промысловая палуба (физическая модель) экспериментального рыболовного судна; эхолот Lowrance elite - 4xHDI; модель тралового комплекса N-MWT-m2 1,65/6,0 м.

Ключевые слова: траловый комплекс, траловая конструкция, гидроканал, эксперименты, динамика.

Благодарности: авторы выражают благодарность генеральному директору ООО «Фишеринг Сервис» Андрею Николаевичу Федорову за предоставление возможности проведения экспериментальных исследований в гидроканале.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания по теме «Разработка физических, математических и предсказательных моделей процессов эксплуатации донного и разноглубинного траловых комплексов».

Для цитирования: Недоступ А.А., Ражев А.О., Насенков П.В., Дятченко С.В., Сысенко В.В., Аскарков Д.В., Сергеев Е.И. Разработка физической модели процесса эксплуатации разноглубинного тралового комплекса, Морские интеллектуальные технологии 2023. № 1 часть 1, С. 237—244. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.031

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.031>

Development of a physical model of the operation process of a mid-water trawl complex

Alexander A. Nedostup¹ nedostup@klgtu.ru, **Alexey O. Razhev**¹ progacpp@live.ru,
Pavel V. Nasenkov¹ pavel.nasenkov@klgtu.ru, **Sergey V. Diatchenko**¹ svd.ks@mail.ru,
Vladimir V. Sysenko¹ vladimirsyenko@hotmail.com, **Dmitry V. Askarov**¹ 6lupi@bk.ru,
Egor I. Sergeev¹ pyroJaeger@gmail.com

¹Kaliningrad State Technical University

Abstract. In the article, the authors present a simulated physical trawl structure and the fishing deck of a fishing vessel according to the theory of multiphysical similarity of trawl structures. Experimental studies of the operation processes of the model of the trawl complex in the hydrochannel of Fishing-Service LLC were carried out. A qualitative picture of the dynamic processes of the trawl complex has been obtained. A comparative evaluation of the model of a fishing machine was carried out during simulated trawling with the provided trawl model N-MWT-m2 1.65/6.0 m. Theoretically and experimentally proved the validity of replacing the imitation net (the number of threads, ropes and knots in the net element). Analyzed the maneuverability of the trawl complex and the fishing vessel was analyzed for the aiming of

trawling and other fishing operations, taking into account warp, pitching and waves. All this was done for the full-scale development of a physical model of the process of operation of a mid-water trawl complex. All calculated characteristics, previously made, were verified during experimental studies in the hydraulic channel of Fishing-Service LLC. Experimental studies were carried out with a model of a mid-water trawl using the following method: the system "trawl model - bare ends - cables - legs - trawl doors - warps". In the course of the experiments, the geometric and power parameters of the physical model of the process of operation of the N-MWT-m2 1.65/6.0 m mid-water trawl complex were obtained. The following equipment was used: a water flow control panel in the hydrochannel; turntable for measuring the speed of water flow: strain gauge complex MIC-200; milliammeter Ts4311; fishing deck (physical model) of an experimental fishing vessel; echo sounder Lowrance elite - 4xHDI; model of the trawl complex N-MWT-m2 1.65/6.0 m.

Key words: trawl complex, trawl structure, hydrochannel, experiments, dynamics.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to Andrey Nikolaevich Fedorov, General Director of Fishing-Service LLC, for providing the opportunity to conduct experimental studies in the hydrochannel.

Financial Support: The study was carried out as part of the state assignment on the topic "Development of physical, mathematical and predictive models for the operation of bottom and mid-water trawl systems."

For citation: Alexander A. Nedostup, Alexey O. Razhev, Pavel V. Nasenkov, Sergey V. Diatchenko, Vladimir V. Sysenko, Dmitry V. Askarov, Egor I. Sergeev Development of a physical model of the operation process of a mid-water trawl complex, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 237—244. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.031

Введение

Все процессы, протекающие с траловыми комплексами (далее ТК), а также в них, являются динамическими (движение судна, буксирующее трал, качка, волнение, боковое течение, удлинение ваера, кабелей, голых концов, канатно-веревочных изделий, гидроподпор и др.), но процесс траления для упрощения его схематизации считают статическим [1]. Упрощение процессов динамики является вынужденной мерой, так как рассчитать параметры в динамике ТК не представляется возможным, из-за большого массива данных и сложных уравнений. Первым предложил рассчитывать ТК в динамике Альтшуль Б.А., в монографии «Динамика траловой системы» он привел уравнение Лагранжа второго рода для определения координат, временных и скоростных параметров ТК [2]. Сегодня многие ученые развивают данную теорию расчета параметров ТК в динамике, при этом пренебрегают важными величинами или упрощают схематизацию ТК [3-10]. Возрастание динамических нагрузок проявляется в ваерах при взятии их на стопор после окончания траления. Современные ваерные лебедки участвуют в маневрах при работе с тралом. Они все чаще работают на нестационарных режимах траления, при динамических нагрузках, которые передаются всему ТК.

Для обеспечения эффективности ТК и рыболовного судна требуется еще на стадии проектирования глубокая проработка различных режимов функционирования, улучшение технических характеристик их отдельных элементов, более обоснованная увязка между собой конструктивных параметров. Все это в итоге будет способствовать улучшению экономических показателей ТК и рыболовного судна. Создание и практическое применение САПР траловых конструкций и АСУ требуют не только знаний всего множества конструктивных и управляющих параметров этих систем, но и аналитического описания всевозможных режимов их эксплуатации. Как было показано выше, сегодня в траловом промысле все большую роль играют неустановившиеся, динамические режимы.

Это поставило перед проектировщиками и эксплуатационниками ТК новые проблемы, решение которых в рамках теории стационарного движения ТК принципиально невозможно. Для решения этих проблем и, в частности, для успешной разработки САПР и АСУ необходимы новые, более широкие теоретические построения, охватывающие не только установившиеся режимы движения ТК, но и режимы неустановившиеся.

Так, к примеру, многие исследователи заменяют ряд ячеей дели на одну ячейю, и таким образом расчетных уравнений становится на порядки меньше. Точность таких расчетов желает лучшего. При этом найти ошибку таких замен весьма сложно, так как получить данные в динамике возможно только с промысла или с экспериментальной установки, а точность показаний датчиков будет на прямую зависеть от погодных условий, точности приборов и др.

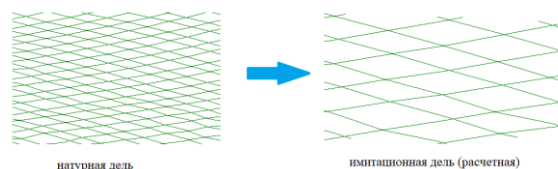


Рис. 1. Натурная дель ТК и ее замена в имитационной модели

Целью исследования является разработка физических, математических и предсказательных моделей процессов эксплуатации разноглубинного тралового комплекса для автоматизации процессов тралового лова, способствующих повышению производительности лова и уменьшению затрат на вылов.

1. Материалы и методы

Кафедрой промышленного рыболовства ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» поставлены задачи экспериментальных исследований процесса эксплуатации модели тралового комплекса в гидроканале ООО «Фишеринг Сервис» (см. рис. 2):



Рис. 2. Гидроканал ООО «Фишеринг-Сервис»

- сравнительная оценка промышленных машин и определение их тягово-скоростных характеристик с учетом архитектуры рыболовного судна и их расстановки;
 - обеспечение необходимой прочности и надежности элементов промышленных механизмов, оборудования и ваеров;
 - теоретически и экспериментально доказать обоснованность замены имитационной дели (число ниток, веревок и узлов в элементе дели (см. рис. 1));
 - выбор основных характеристик ТК, в том числе устойчивость траловых досок;
 - анализ маневренности ТК и рыболовного судна для прицельности тралового лова и выполнения других промысловых операций с учетом ваера, качки и волнения;
 - анализ способов подъема тралового мешка, выливки улова, сохранения его качества;
 - обеспечение безопасности рыболовного судна и экипажа.
- В приборную базу экспериментальных исследований в гидроканале ООО «Фишеринг Сервис» входили:
- пульт управления потоком воды в гидроканале;
 - вертушка для измерения скорости потока воды ИСП-ЗМ:
 - тензометрический комплекс МІС-200;
 - миллиамперметр Ц4311 для измерения силы тока на лебедках;
 - промышленная палуба (физическая модель) экспериментального рыболовного судна (см. рис. 3);
 - эхолот Lowrance elite - 4xHDI;
 - траловый комплекс N-MWT-m2 1,65/6,0 м (см. рис. 4).



Рис. 3. Промысловая палуба (физическая модель) рыболовного судна

Приборная база (см. рис. 4) позволяет собирать массив данных с проведенных экспериментов в динамике, это натяжение в ваерах, сила тока в

двигателе ваерной лебедки, угол наклона ваера, длина ваера, горизонт хода верхней подборы трала, вертикальное раскрытие устья трала, горизонтальное раскрытие устья трала, расстояние между траловыми досками, эхозаписи, скорость потока и др.

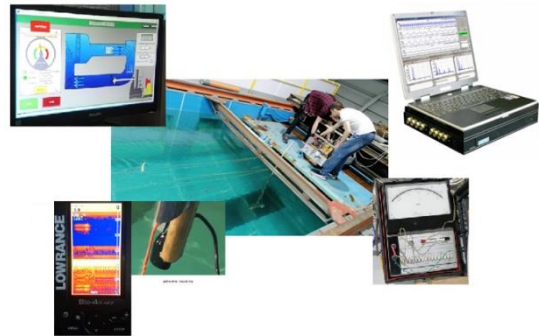


Рис. 4. Приборная база, используемая в ходе проведения экспериментов

Чертеж модели разноглубинного трала N-MWT-m2 1,65/6,0 м приведен на рис. 5, а конструктивные его параметры приведены в табл. 1.

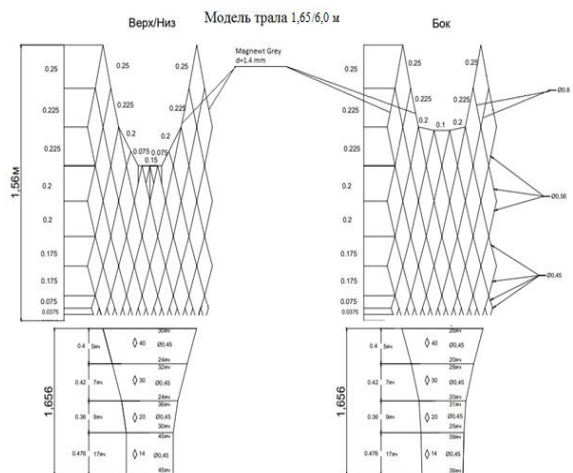


Рис. 5. Модель разноглубинного трала N-MWT-m2 1,65/6,0 м

Таблица 1
Конструктивные характеристики модели разноглубинного трала N-MWT-m2 1,65/6,0 м

Модель трала	Сплошность, F_0	Площадь ниток и канатов, $F_{НК}$, м ²
N-MWT-m2 1,65/6,0 м	0,06	0,225

Научная новизна работы авторов статьи заключается в разработке физической модели процесса эксплуатации разноглубинного тралового комплекса. Методике определения геометрических и силовых характеристик разноглубинного тралового комплекса в гидроканале ООО «Фишеринг-Сервис».

Экспериментальные исследования с разноглубинным траловым комплексом проводится следующим методом: система «модель трала - голые концы - кабели - лапки - траловые доски - ваера» (с

помощью лазерных линеек замеряются: горизонт хода верхней подборки, горизонт хода досок, вертикальное и горизонтальное раскрытие устья трала, расстояния между траловыми досками, и с помощью датчика измеряются усилия в ваере, с помощью вертушки измеряется скорость потока, с помощью эхолота определяется горизонт хода верхней подборки трала, а также горизонт хода траловых досок).

2. Результаты экспериментов

В ходе проведения экспериментов были получены геометрические и силовые параметры физической модели процесса эксплуатации разноглубинного тралового комплекса N-MWT-m2 1,65/6,0 м, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2

Экспериментальные данные модели трала N-MWT-m2 1,65/6,0 м

Длина ваера $S_в$, м	Диаметр барабана лебедки с намотанным ваером $D_в$, мм	Скорость потока воды v , м/с	Время постановки трала t_n , сек	Горизонтальное раскрытие устья трала по гужу, L , м	Вертикальное раскрытие устья трала по гужу, H , м	Горизонтальное раскрытие между траловыми досками, $L_д$, м	Горизонт хода		Натяжение в тензодатчиках, T Н		Угол наклона ваера (с блока до траловой доски), α град	Время выборки трала, t_e сек	Ток, mA
							Горизонт хода траловых досок, $H_д$, м	Горизонт хода гидродинамической щитки, $H_{щ}$, м	Левый блок	Правый блок			
4	31	0,6	71	0,67	0,92	1,23	0,94	0,82	4,3	4,3	73	79	47
	32	0,7	68	0,83	0,80	1,53	0,67	0,45	3,9	5,4	70	81	47,5
	28	0,8	62	0,88	0,83	1,65	0,26	0,12	4,7	5,4	70	101	45,5
5	38	0,6	83	0,75	0,86	1,4	1,18	1,08	3,9	4,0	85	104	47,5
	28	0,7	85	0,88	0,82	1,62	0,73	0,67	3,4	5,8	75	118	46,5
	30	0,8	82	0,95	0,76	1,74	0,48	0,37	4,4	4,7	80	129	47
6	27	0,6	106	-	-	-	-	-	3,4	3,7	87	136	46,5
	28	0,7	104	0,91	0,78	1,74	0,91	0,88	3,7	4,8	70	157	46
	25	0,8	143	1,01	0,70	1,89	0,55	0,50	4,2	4,1	80	152	47

Примечание: $\beta=65$ град, угол наклона ваера (с лебедки до блока); $L_в=0,38$ м, - расстояние между ваерными блоками; $M_д=0,083$ кг, масса траловой доски; $V_д=0,05$ м; хорда траловой доски; $L_д=0,07$ м; размах траловой доски, $L_к=2,1$ м, - длина кабелей; $M_г=0,1$ кг, масса груза-углубителя.

Проведены экспериментальные исследования с физической моделью разноглубинного тралового комплекса N-MWT-m2 1,65/6,0 м в гидроканале ООО «Фишеринг Сервис». На рис. 6 изображена модель разноглубинного трала N-MWT-m2 1,65/6,0 м в гидроканале.

Экспериментальные исследования модели ТК N-MWT-m2 1,65/6,0 м в гидроканале ООО «Фишеринг Сервис» проводились с 4 по 6 октября 2021 г. Фотографии с экспериментов изображены на рис. 7-8.



Рис. 6. Модель разноглубинного трала N-MWT-m2 1,65/6,0 м в гидроканале ООО «Фишеринг Сервис»

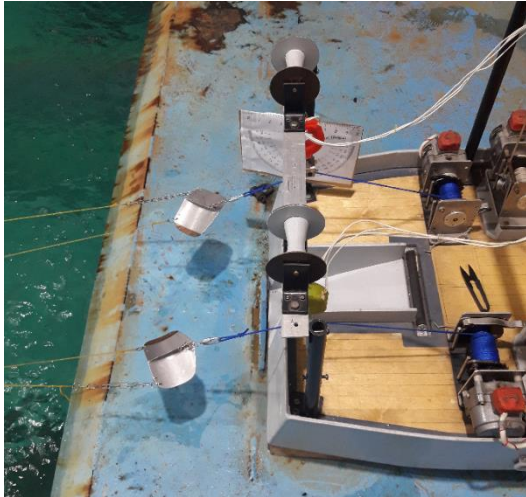


Рис. 7. Травление ваеров модели разноглубинного трала N-MWT-m2 1,65/6,0 м



Рис. 8. Замер натяжения в тензодатчике, снятие показаний угломера

На основании данных табл. 2 построены графики зависимостей (рис. 9-16).

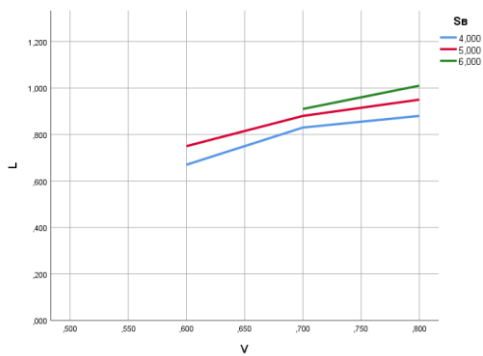


Рис. 9. График зависимости горизонтального раскрытия от скорости

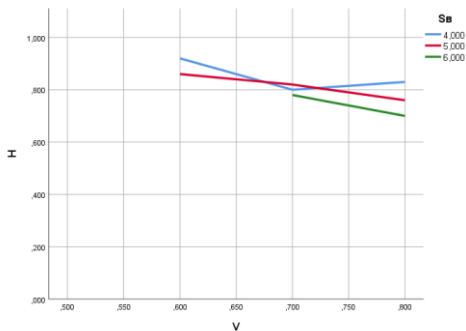


Рис. 10. График зависимости вертикального раскрытия от скорости

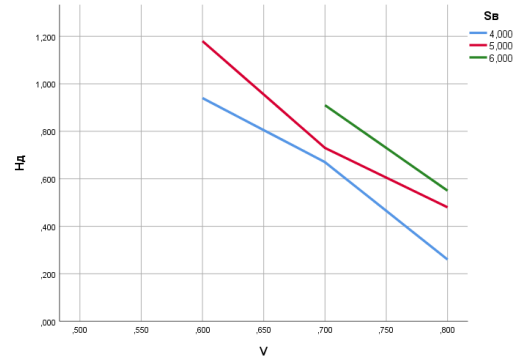


Рис. 11. График зависимости горизонта хода траловых досок от скорости

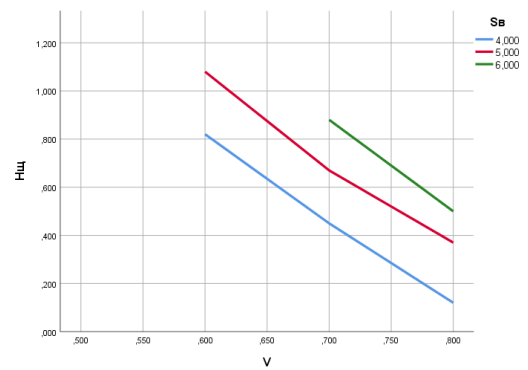


Рис. 12. График зависимости горизонта хода гидродинамического щитка от скорости

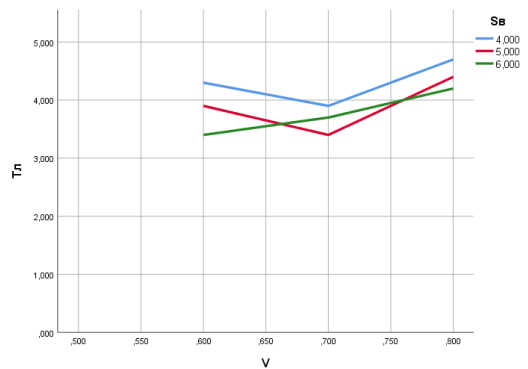


Рис. 13. График зависимости натяжения левого тензодатчика от скорости

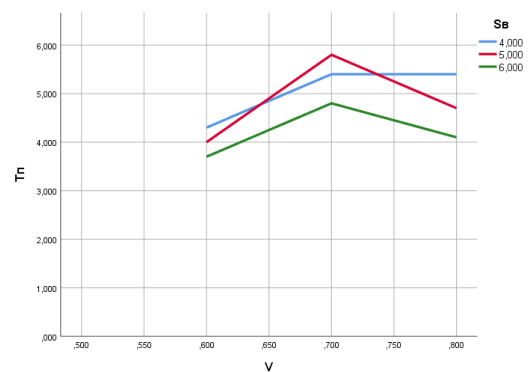


Рис. 14. График зависимости натяжения правого тензодатчика от скорости

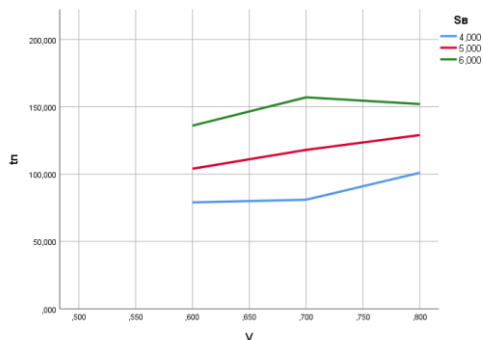


Рис. 15. График зависимости времени постановки трала от скорости

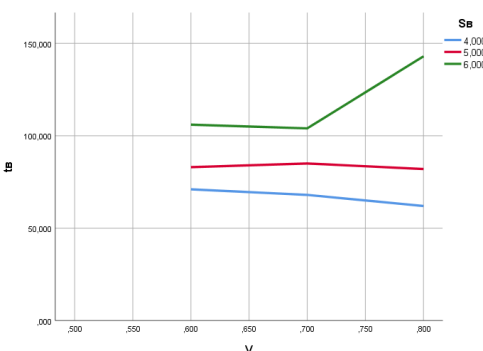


Рис. 16. График зависимости времени выборки трала от скорости

Заключение

На основании экспериментальных данных, полученных путем тщательно проведенных исследований, при соблюдении необходимых нам критериев теории подобия, поставлена задача, спроектировать натуральный разноглубинный трал для лова ряпушки (*Coregonus albula*) в озере Виштынецкое, в целях проведения полномасштабных экспериментальных исследований с натурным тралом, в целях дальнейшего сбора экспериментальных данных для получения полноценных статистических данных, которые позволят нам в дальнейшем более точно и эффективно проектировать, конструировать и эксплуатировать промысловые комплексы.

Литература

1. Фридман А.Л. Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства. - М: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 327 с.
2. Альтшуль Б.А., Фридман А.Л. Динамика траловой системы. - М. - Агропромиздат. - 1990. - 240 с.
3. Кояма Т. A calculation method for matching trawl gear to towing power of trawlers // FAO. Technical conference on fish finding, purse seining and aimed trawling. FF/70/65. - 1970. - 5. - p. 15.
4. Lee C.-W., Lee Ju.-H. Modeling of a midwater trawl system // Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems. DEMaT 1999. - 2000. - p. 151-161.
5. Vincent B. A new generation of tools for trawls. Dynamic numerical simulation // Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems. DEMaT 1999. - 2000. - p. 99-107.
6. Cha B.-J., Lee C.-W., Cho B.-K. Dynamic simulation of midwater trawl system using a personal computer // Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems. V. 2. DEMaT 2001. - 2002a. - p. 105-111.
7. Cha B.-J., Lee C.-W., Cho B.-K., Kim H.-Y., Won S.-J. Dynamic simulation of a midwater trawl system using a personal computer // Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems. DEMaT 2001. - 2002b. - p. 155-161.
8. Choe M.-L., Lee C.-W., Lee G.-H., Cha B.-J., Gyung H.-P. Modeling of the otter board behavior in consideration of the effects of the ship motion // Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems. V. 5. DEMaT 2007. - 2007. - p. 77-88.
9. Kotwicki S., Weinberg K.L., Somerton D.A. The effect of autotrawl systems on the performance of a survey trawl // Fishing Bulletin. - 2006. - № 104 - p. 35-45.
10. Lee C.-W., Lee Ju.-H., Cha B.-J., Kim H.-Y., Lee Ji.-H. Physical modeling for underwater flexible systems dynamic simulation // Ocean engineering. - 2005. - №32. - p. 331-347.

References

1. Fridman A.L. *Teoriya i proektirovanie orudiy promyshlennogo rybolovstva* [Theory and design of commercial fishing gear]. - M: Legkaya i pishchevaya promyshlennost', 1981, 327 s.
2. Al'tshul' B.A., Fridman A.L. *Dinamika tralovoy sistemy* [Trawl System Dynamics]. - M.: Agropromizdat, 1990, 240 s.
3. Koyama T. *Metod rascheta soglasovaniya tralovykh orudiy s tyagovoy siloy traulerov* [A calculation method for matching trawl gear to towing power of trawlers] // FAO. Technical conference on fish finding, purse seining and aimed trawling. FF/70/65, no 5, 1970, s. 15.
4. Lee C.-W., Lee Ju.-H. *Modelirovanie sistemy raznoglubinnogo trala* [Modeling of a midwater trawl system] // Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems. DEMaT 1999, 2000, s. 151-161.

5. Vincent B. Novoe pokolenie instrumentov dlya tralov. Dinamicheskoe chislennoe modelirovanie [A new generation of tools for trawls. Dynamic numerical simulation] // Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems. DEMaT 1999, 2000, s. 99-107.
6. Cha B.-J., Lee C.-W., Cho B.-K. *Dinamicheskoe modelirovanie sistemy raznoglubinnogo trala s ispol'zovaniem personal'nogo komp'yutera* [Dynamic simulation of midwater trawl system using a personal computer] // Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems. V. 2. DEMaT 2001, 2002, s. 105-111.
7. Cha B.-J., Lee C.-W., Cho B.-K., Kim H.-Y., Won S.-J. *Dinamicheskoe modelirovanie sistemy raznoglubinnogo trala s ispol'zovaniem personal'nogo komp'yutera* [Dynamic simulation of a midwater trawl system using a personal computer] // Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems. DEMaT 2001, 2002, s. 155-161.
8. Choe M.-L., Lee C.-W., Lee G.-H., Cha B.-J., Gyung H.-P. *Modelirovanie povedeniya vydry s uchetom vliyaniya dvizheniya korablya* [Modeling of the otter board behavior in consideration of the effects of the ship motion] // Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems. V. 5. DEMaT 2007, 2007, s. 77-88.
9. Kotwicki S., Weinberg K.L., Somerton D.A. *Vliyanie sistem avtomaticheskogo traleniya na proizvoditel'nost' poiskovogo trala* [The effect of autotrawl systems on the performance of a survey trawl] // Fishing Bulletin, no 104, 2006, s. 35-45.
10. Lee C.-W., Lee Ju.-H., Cha B.-J., Kim H.-Y., Lee Ji.-H. *Fizicheskoe modelirovanie dlya dinamicheskogo modelirovaniya podvodnykh gibkikh sistem* [Physical modeling for underwater flexible systems dynamic simulation] // Ocean engineering, no 32, 2005, s. 331-347.

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 Алексеевич Недоступ, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: nedostup@klgtu.ru

Алексей Олегович Ражев, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: progacpp@live.ru

Павел Владимирович Насенков, соискатель кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: pavel.nasenkov@klgtu.ru

Сергей Васильевич Дятченко, доктор технических наук, профессор кафедры судостроения, судоремонта и морской техники, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: sergey.diatchenko@klgtu.ru

Сысенко Владимир Владимирович, магистрант кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский прт, 1, e-mail: vladimirsyenko@hotmail.com

Аскарлов Дмитрий Всеволодович, магистрант кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский прт, 1, e-mail: 6lupi@bk.ru

Alexander A. Nedostup Ph.D. (Eng), assistant professor of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: nedostup@klgtu.ru

Aleksey O. Razhev, Ph.D. (Eng), Leading Researcher, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: progacpp@live.ru

Pavel V. Nasenkov, Research scholar of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: pavel.nasenkov@klgtu.ru

Sergey V. Dyatchenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Shipbuilding, Ship Repair and Marine Engineering, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: sergey.diatchenko@klgtu.ru

Vladimir V. Sysenko, master's student of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy Prospect, 1, e-mail: vladimirsyenko@hotmail.com

Dmitry V. Askarov, master's student of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy Prospect, 1, e-mail: 6lupi@bk.ru

Егор Ильич Сергеев, аспирант, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: pyrojaeger@gamil.com

Egor I. Sergeev, graduate student, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: pyrojaeger@gamil.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 29.12.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 28.01.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 29.01.2023.

Научная статья

УДК 656.61.052: 629.123: 004.021

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.032>

Синтез нечёткой системы автоматического управления скоростным режимом движения автономного судна при следовании по программной траектории

В.И. Филатов¹ Filatov_viktor1994@mail.ru, В.В. Астреин¹ Astrein-vadim@rambler.ru

¹Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93

Аннотация. Одним из приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации является разработка интеллектуальных систем управления новыми видами транспорта. Применительно к морской отрасли, таким направлением является создание полностью автономного судна – МАНС. В данном исследовании поставлена задача разработки и синтеза интеллектуальной системы управления скоростью судна, которая регулирует его режим работы (на примере регулирования частоты вращения гребного винта), исходя из своего внутреннего состояния для обеспечения безопасности, а также внешнего состояния для обеспечения оптимальности, при следовании судна по программной траектории в фазе плавания – «Морской переход».

Решение поставленной задачи может лежать в рамках системного анализа и разработки алгоритмического аппарата, который обеспечивает приблизительное решение задачи управления скоростным режимом судна, в некоторой степени сходное с решением судоводителя. В разработанной модели используются методы, основанные на теории нечёткого управления и нечёткой логике.

Результатом исследования является модель системы автоматического управления скоростным режимом судна с нечётким регулятором. Приведены численные результаты моделирования выработки решений нечёткого контроллера, а также работа всей системы главного двигателя. Приведённый метод решения позволяет использовать многокритериальный подход к управлению скоростью судна, и может быть использован, как альтернатива традиционным регуляторам на основе законов управления ПИД.

Ключевые слова: автономное судно, нечёткая логика, нечёткое управление, автоматическая система управления, безопасность судовождения, МАНС.

Для цитирования: Филатов В.И., Астреин В.В. Синтез нечёткой системы автоматического управления скоростным режимом автономного судна при следовании по программной траектории, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 245—253. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.032

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.032>

Fuzzy automatic Control System Synthesis for Ship's Speed mode during sailing through program trajectory

Viktor I. Filatov¹ Filatov_viktor1994@mail.ru, Vadim V. Astrein¹ Astrein-vadim@rambler.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. There one of the priority directions for the development of science, technology and engineering in the Russian Federation is the development of intelligent control systems. In relation to the maritime industry, such direction is the creation of a fully autonomous marine Vessel – MANS. In this article, the target is to develop and synthesize an intelligent control system for the ship's Speed, which regulates Main Engine operation mode (using the example of rotational frequency of propeller), based on its internal state, to ensure safety, as well as the external state - to ensure optimality, when the ship follows program trajectory in the absence of navigational hazards.

The solution of abovementioned problem may lie within the system analysis and the development of an algorithmic sources that provides an approximate solution to the problem of controlling the ship's speed, and the developed solutions would be similar to the decision of the navigator in some manner. To solve the problem of controlling the rotational frequency of the main engine shaft, in the considered model based on methods of the theory of automatic control, the theory of fuzzy control and fuzzy logic are used.

The result of this research is a Model of the automatic control system for the Ship's speed, which is based on a fuzzy controller that provide the RPM solution. The numerical results of modeling fuzzy controller, as well as the operation of the entire system of the main engine, are presented. The given solution method allows using a multifactorial approach to ship speed control, and can be used as an alternative to traditional controllers based on PID regulation laws.

Key words: autonomous vessel, fuzzy logic, fuzzy control system, automatic control system, safety of navigation.

For citation: Viktor I. Filatov, Vadim V. Astrein. Fuzzy automatic Control System Synthesis for Ship's Speed mode during sailing through program trajectory, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 245—253. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.032

Введение

В настоящее время морское судно является наиболее важным средством доставки грузов на дальние расстояния. Существует множество целевых задач и условий, которые ставятся перед ним. Наиболее значимыми являются: экономическая оптимальность и обеспечение прихода судна в порт в назначенное время. Главным условием выполнения поставленной задачи (задач) является обеспечение безопасности судоходства, что включает в себя: безопасность внутренней системы судна (механизмов, экипажа, оборудования) и безопасность окружающей среды (предотвращения загрязнения моря, воздуха и т.д.). Однако, в процессе выполнения рейса, существуют обстоятельства, когда выполнение одной задачи (задач) судном противоречит обеспечению выполнения других задач. В данной статье рассмотрен метод системного моделирования, основанный на синтезе классической теории автоматического управления и элементами искусственного интеллекта. Целью исследования является построение модели системы автоматического управления скоростным режимом судна, которая позволяет регулировать режим работы ГД, основанной на методе продукционных экспертных систем, в основе которых лежат правила и элементы нечёткого управления и нечёткой логики.

Отечественные исследования, посвящённые применению методов нечёткой логики в судовождении, нашли отражение в работах [11 - 14]. Данные работы посвящены созданию нечётких адаптивных регуляторов курса судна. В иностранном исследовании [10] рассмотрен метод применения нечёткой логики для управления ГД судна, как альтернатива традиционным ПИД-регуляторам. Также существует множество работ по нечёткой логике, где рассматриваются вопросы построения экспертных систем, нечёткой кластеризации и других задач.

1. Анализ структуры интеллектуальной системы управления главным двигателем

При рассмотрении той или иной системы исходным этапом ее изучения является определение ее границы. [4] Так как речь идёт о системе автоматического регулирования скоростного режима главного двигателя (ГД), то необходимо выделить объекты, относящиеся к внутренней системе, а также объекты, относящиеся к среде – такие объекты, которые не входят во внутреннюю системы, но непосредственно оказывают на неё влияние из вне.

Объектом регулирования является морское судно, орган управления которого – судовой ГД – силовой агрегат, приводящий его в движение. Другим важным объектом внутренней системы является интеллектуальный автоматический контроллер – автоматический регулятор, основанный на методах нечёткого управления, который позволяет вырабатывать решение об изменении режима работы главного двигателя. Такие решения должны быть сходны с теми, которые принимает судоводитель, управляющий судном, при переходе судна по заданной программной траектории движения (ПТД).

Режимом работы двигателя называется его состояние в процессе работы, характеризуемое

совокупностью ряда параметров, к числу которых относятся N_e — эффективная мощность; M — крутящий момент; ω — скорость вращения вала гребного винта; p_k — давление наддува; g_e — эффективный удельный расход топлива и др. Между параметрами работы ГД в установившемся режиме существуют определенные функциональные зависимости, определяемые теорией рабочих процессов двигателя. [3] Обобщенная формула этих зависимостей:

$$N_e = f(M, \omega, p_k, g_e, \dots) \quad (1)$$

При построении модели сделано предположение, что судно следует на ПТД в условиях, где отсутствуют навигационные опасности. Так как ПТД состоит из набора прямолинейных отрезков – линий заданного пути (ЛЗП), то она может быть получена с заданной точностью с помощью кусочно-линейных методов интерполяции:

$$\text{ПТД}(x, y) = \begin{cases} \text{ЛЗП}_1(x, f_1(x)), x \in [x_0, x_1] \\ \text{ЛЗП}_2(x, f_2(x)), x \in [x_1, x_2] \\ \dots \\ \text{ЛЗП}_i(x, f_i(x)), x \in [x_{i-1}, x_i] \\ \dots \\ \text{ЛЗП}_n(x, f_n(x)), x \in [x_{n-1}, x_n] \end{cases} \quad (2)$$

где: $f_i(x) = k_i x + b_i$, k_i , b_i – коэффициент наклона и порог для каждого локсодромического отрезка траектории движения, x и y – прямоугольные пространственные координаты точек ПТД на поверхности эллипсоида.

В таком случае, с точки зрения физических процессов, на судно оказывает влияние гидрометеорологическая обстановка (ветер, течение, волнение), что влияет на показатели эффективности рейса.

2. Постепенная формализация модели

2.1. Формализация входных и выходных переменных

Для конструирования модели ГД использован метод построения информационной модели ГД – «чёрный ящик». При таком методе предполагается «скрыть» часть процессов в ГД, исходя из допущения, что они регулируются автоматически.

Следующим этапом является выделение тех величин, которые оказывают воздействие на судна, при выполнении рейса. Такие величины являются входными переменными, которые отражают степень влияния среды на принимаемые решения. Важным условием, как отмечено ранее, является безопасность внутренней системы, которая может быть обеспечена в процесс регулирования режима работы ГД в безопасном диапазоне, с помощью величины N_e . Данная величина используется при автоматическом регулировании в современных ГД с электронным блоком управления. [6] Для удобства взято нормированное значение – коэффициент нагрузки:

$$N_{e\%} = \frac{N_e}{N_{e\text{ном}}} \cdot 100 \quad (3)$$

где: $N_{e\text{ном}}$ – номинальное значение мощности, гарантированное заводом-изготовителем для эксплуатации ГД в определённых условиях.

Для регулирования также важна динамика изменения $N_{e\%}$, для учёта которую можно выразить в виде уравнения:

$$\Delta N_{e\%} = \frac{dN_{e\%}}{dt} \Delta t \quad (4)$$

где: Δt - период времени начала и конца накопления приращения к $N_{e\%}$.

Для формирования переменных, отражающих влияние среды использованы эвристические выводы, сделанные на основе типовых рейсовых заданий для танкеров класса «Афрамекс».

Важнейшим показателем экономической эксплуатации ГД является суточный расход топлива - g_c , который указывается в чартер-партии, в разделе технического задания и его превышения является критическим. Для оценки его динамики также предлагается выполнить накопление в заданном временном отрезке:

$$\Delta g_c = \frac{dg_c}{dt} \Delta t \quad (5)$$

Важным коммерческим условием, зависящим как от внутреннего состояния системы, так и от состояния среды является скорость $v_3(T_D)$, выполнение которой необходимо обеспечить для достижения судном места назначения в назначенное время, которая рассчитывается, как:

$$\begin{aligned} \Delta T_3 &= T_3 - T_D; & T_D(v_D) &= T_i + \Delta T_D(v_D); \\ v_D(T_i) &= f(\omega, q_B, v_{TB}, q_T, v_{TT}, h_B, \dots); \\ d(i, j) &= \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}, & (6) \\ i &= \overline{1, N-1}, j = \overline{i+1, N}; \\ \Delta T_D(v_D) &= \frac{\sum d(i, j)}{v_D}; & v_3(T_D) &= \frac{\sum d(i, j)}{\Delta T_3}. \end{aligned}$$

где: T_3 – фиксированное время прибытия, T_i – момент измерения v_D ; ΔT_3 – интервал времени, доступный для плавания с учётом прибытия в пункт назначения в T_3 , $T_D(v_D)$ – значение расчётного времени прибытия при действительной скорости v_D (переменная), зависящей от частоты вращения ω и величин, определяющих гидрометеорологические условия плавания: q_B, v_{TB} – элементы относительного ветра, q_T, v_{TT} – элементы относительного течения, h_B – высота регулярного волнения, [м]; $d(i, j)$ – дистанция между соседними путевыми точками [м. мили], ΔT_D – интервал времени, [ч], между T_i и временем расчётного прибытия при действительной скорости.

Тогда отклонение от действительного наблюдаемого значения v_D от v_3 в момент времени определяется, как:

$$\Delta v(T_i) = v_3(T_D) - v_D(T_i) \quad (7)$$

А его динамика по аналогии с (4, 5):

$$\Delta \Delta v = \frac{d\Delta v}{dt} \Delta t \quad (8)$$

2.2. Построение модели ГД судна

Существует множество математических моделей судового ГД, которые характеризуются детальностью построения структурных элементов, входящих в его систему. Выбор модели зависит в первую очередь, от задач и целей, которые предстоит исследовать. В данном случае нет необходимости детально раскрывать взаимосвязь внутренних компонентов ГД, поэтому достаточно ограничиться моделью, представленной на схеме (рис. 1.).

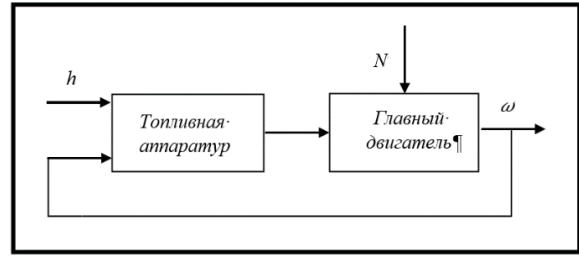


Рис. 1. Функциональная схема судового ГД, как объекта регулирования и его структурных элементов

Динамика судового двигателя, как объекта регулирования скорости вращения вала, используется линейное дифференциальное уравнение первого порядка:

$$T_D \frac{d\varphi}{dt} + k_D \varphi = \chi + \theta_\rho \rho - \theta_D \alpha_D \quad (9)$$

где: $\varphi = \Delta \omega / \omega_0, \chi = \Delta h / h_0, \rho = \Delta p_k / \rho_{k_0}, \alpha_D = \Delta N / N_0$ - безразмерные относительные координаты, T_D – постоянная времени двигателя, [с], k_D – безразмерный коэффициент самовывравнивания, θ_ρ – безразмерный коэффициент усиления по наддуву, θ_D – безразмерный коэффициент по нагрузке, Δh - относительное изменение координаты положения топливной рейки. [3, 10]

Динамическую систему ГД можно представить с помощью набора передаточных функций, которые полностью описывают связи между выходом и входом объекта при нулевых начальных условиях. Тогда передаточная функция ГД имеет вид:

$$\varphi = W_D^\chi(p) \chi + W_D^\rho(p) \rho + W_D^\alpha(p) \alpha_D; \quad (10)$$

$$W_D^\chi(p) = \frac{1}{T_D p + k_D}; \quad (11)$$

$$W_D^\rho(p) = \frac{\theta_\rho}{T_D p + k_D}; \quad (12)$$

$$W_D^\alpha(p) = -\frac{\theta_D}{T_D p + k_D}. \quad (13)$$

где: $W_D^\chi(p)$ – передаточная функция по ходу топливной рейки, $W_D^\rho(p)$ - передаточная функция по давлению наддува, $W_D^\alpha(p)$ – передаточная функция по нагрузке.

Параметры, необходимые для моделирования работы ГД в уравнении (10) выбраны из формуляра результатов технических испытаний производительности ГД “Sea Trials – Engine tests performance results”, а также технической документации САУ-котлоуправления положения топливной рейки “Automatic Governor controller manual”.

Используя преобразование Лапласа, выполнено приведение передаточной функции модели ГД (10) к уравнению пространства состояний для нулевых начальных условий:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (14)$$

где: x – вектор состояний, u – входное воздействие, y – выходное воздействие.

Далее, исходя из наблюдений за показателями работы ГД и среды, можно сформулировать закономерности в виде предикатов:

$$\begin{aligned} \forall \Delta \omega, P(\Delta \omega) \wedge Q(\Delta \omega); \\ P(\Delta \omega) = \Delta \Delta v, Q(\Delta \omega) = \Delta g_c \end{aligned} \quad (15)$$

Тогда функции для величин Δv и Δg_c также можно построить передаточные функции, аналогично (11-13). При таком подходе очевидно, что передаточная функция отражает переходный процесс приращения скорости и расхода топлива только при определённых условиях погоды. В данной модели сделано допущение, что данный процесс можно описать линейным дифференциальным уравнением первого порядка.

На основании результатов натурных данных ГД танкера класса «Афрамекс», полученных на ходовых испытаниях, построены регрессионные МНК-модели (рис. 2, 3). Данные кривые приняты к расчёту, при условии определённых гидрометеорологических условий, а именно: при силе ветра ≤ 5 баллов (по шкале Бофорта) и волнении ≤ 4 баллов (по шкале Дугласа). При большей балльности графики этих функций значительно отличаются от заявленных в чартер-партии, при расчёте экономических показателей рейса.

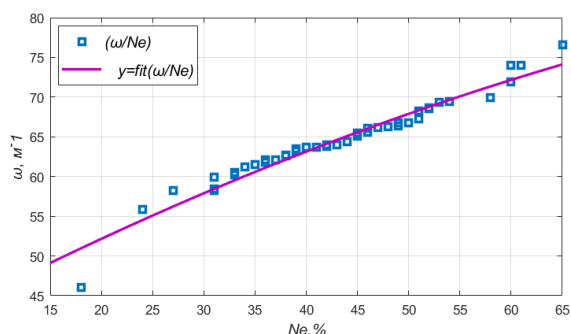


Рис. 2. Регрессионная модель ($\omega / N_{e\%}$)

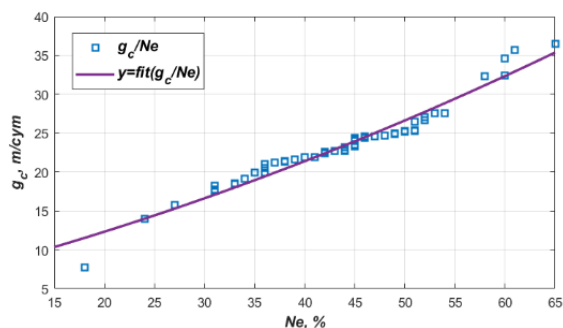


Рис. 3. Регрессионная модель ($g_c / N_{e\%}$)

В условиях плавания судна по ПТД, ГД эксплуатируется в режиме, близком к номинальному, поэтому регулировка частоты вращения вала будет выполняться в рабочем диапазоне «навигационного» режима. Для данного типа ГД «MAN B&W 6G60ME-C9.2 with EGB Part load tuning» это $50 < \omega < 80, \text{ м}^{-1}$.

Также для сглаживания выходной величины применён дискретный фильтр типа FIR, с коэффициентами k_1 и k_2 , вида:

$$\tilde{y} = \frac{k_1 + k_2 z^{-1}}{1} \quad (16)$$

2.3. Структуризация модели

В данном разделе рассмотрена структура и организация элементов нечёткой системы автоматического управления скоростным режимом автономного судна (рис. 4). Дано краткое описание основных блоков, переменных и подсистем.

Под группой «а» показан набор нулевых условий (переменные получены от навигационных приборов), в которых находится система, к ним относятся:

$$S_0 = \{v_0, \omega_0, N_{e\%}, g_{c0}\} > \quad (17)$$

Под «б» находится модель ГД, описанная с помощью линеаризованной модели пространства состояний (14). «В» - является подсистемой простых связей и интеграторов, которая позволяет отслеживать изменения численных значений параметров мониторинга. В блоке «г» находятся входные лингвистические переменные (4-8), которые будут обработаны в блоке «д» интеллектуальной системы автоматического управления, основанной на методах нечёткой логики и базе правил. Именно «д» вырабатывает решение об изменении режима работы ГД. «Е» - обратная связь, которая является основой приспособления к изменяющимся условиям.

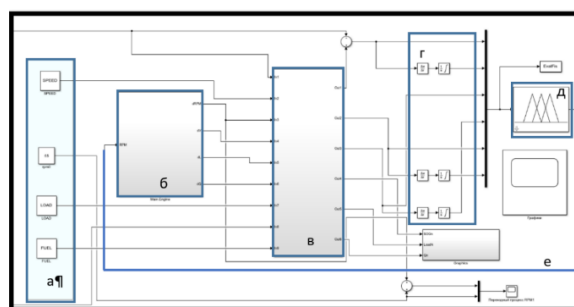


Рис. 4. Блок-схема интеллектуальной системы управления скоростным режимом судна

2.4. Многокритериальное управление скоростным режимом движения судна

При управлении скоростным режимом движения судна необходимо решать задачу принятия решений одновременно по нескольким критериям. Так, первая группа: $\Delta v(T_i)$ - характеризует критерий расписания прибытия, Δg_c - экономический критерий, $\Delta N_{e\%}$ - критерий безопасности внутренней системы. Вторая группа переменных: $\Delta v, \Delta g_c, \Delta N_{e\%}$ - динамику их изменения. Обозначим первую группу переменных - (x_1, x_2, x_3) , а вторую группу - (x_3, x_4, x_5) . Тогда задача многокритериального управления скоростью судна решается путём нахождения корней уравнений, удовлетворяющих системе ограничений:

$$g_i(|x_1|, |x_2|, |x_3|) \leq b_i(x_3, x_4, x_5), i = \overline{1, m} \quad (18)$$

где функция F_k достигает минимального значения:

$$F_k = f_k(|x_1|, |x_2|, |x_3|), k = 1, 2, 3. \quad (19)$$

Здесь f_k - целевые функции, которые отображаются на множестве достижимости.

При решении поставленной задачи, в векторном виде функционал множественного критерия качества управления скоростным режимом движения судна, для использования в нечёткой САУ, выражается, как:

$$J(X) = (J_1(X), J_2(X), J_3(X), \dots) \rightarrow \min \quad (20)$$

где: $J(X)$ - вектор-функция аргумента $X \in D, D \rightarrow R^6$ -допустимая область решений.

Отличительной особенностью данной задачи является расстановка приоритетов выполнения каждого отдельного критерия качества. В морской отрасли традиционно применяется принцип "Safety first", что ставит остальные критерии коммерческого характера на «задний» план. Методы нечёткого

управления с помощью правил позволяют сформировать данные приоритеты с помощью коэффициентов значимости. Таким образом, при таком подходе, теоретически, может быть построена система, решающая данную задачу аналогично судоводителю.

3. Нечёткая система автоматического управления скоростным режимом судна

3.1. Построение лингвистических переменных

В системах нечёткого вывода лингвистические переменные, которые используются в нечетких высказываниях подусловий правил нечетких продукций, часто называют входными лингвистическими переменными, а переменные, которые используются в нечетких высказываниях подзаключений правил нечетких продукций, часто называют выходными лингвистическими переменными (ЛП). [5, 6, 7, 8]

Применительно к данной системе, использованы общепринятые обозначения для формирования набора термов ЛП:

1. *NS* – незначительное негативное;
2. *NM* – среднее негативное;
3. *NB* – значительное негативное;
4. *Z* – нулевое, близкое к нулевому;
5. *PS* – незначительное положительное;
6. *PM* – среднее положительное;
7. *PB* – значительное положительное;

Применительно к входным ЛП, приведённые термы дают лингвистическую оценку входных численных значений, а выходная ЛП даёт лингвистическую оценку управляющему воздействию. (Таблица 1)

Таблица 1
Формирование термов лингвистических переменных

	ЛП.	Тип	Термы
1	Δv	Вход	$\langle NB, NS, Z, PS, PB \rangle$
2	$\Delta \Delta v$	Вход	$\langle NS, Z, PS \rangle$
3	g_c	Вход	$\langle NB, NS, Z, PS, PB \rangle$
4	Δg_c	Вход	$\langle NS, Z, PS \rangle$
5	$N_{e\%}$	Вход	$\langle NB, Z, PB \rangle$
6	$\Delta N_{e\%}$	Вход	$\langle NS, Z, PS \rangle$
7	$\Delta \omega$	Выход	$\langle NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB \rangle$

Для формирования термов могут быть использованы различные функции принадлежности. В данной работе применены треугольные нечёткие числа (ТНЧ) и трапециевидные нечёткие интервалы (ТНИ) поскольку, с точки зрения экспертной оценки, значения оцениваемых величин, в определённой степени, известны.

$$A_{\text{ТНЧ}} = \langle a, \alpha, \beta \rangle \quad (21)$$

$$A_{\text{ТНИ}} = \langle a, b, \alpha, \beta \rangle \quad (22)$$

где: α, β – левый и правый коэффициенты нечёткости, а a, b – верхнее и нижнее модальное значение ТНИ.

Построение границ и коэффициентов нечёткости термов ЛП представлено в таблице 2.

Таблица 2

Задание границ и функций принадлежности

	ЛП	Границы: $\langle a, b, \alpha, \beta \rangle$	Ед.и.	Тип ФП
1	Δv	$\langle -4, -3, 2, 1 \rangle; \langle -1.5, 1, 1 \rangle;$ $\langle 0, 1, 1 \rangle; \langle 1.5, 1, 1 \rangle;$ $\langle 1.5, 2.5, 1, 2 \rangle;$	Узл.	ТНЧ, ТНИ
2	$\Delta \Delta v$	$\langle -\infty, -1, 0, 1 \rangle;$ $\langle 0, 0.5, 0.5 \rangle;$ $\langle 1, \infty, 1, 0 \rangle$	Узл.	ТНЧ, ТНИ
3	g_c	$\langle 20, 23, 2, 2 \rangle; \langle 24.5, 1.5, 1 \rangle;$ $\langle 26, 1, 1 \rangle;$ $\langle 1.5, 1, 1 \rangle;$ $\langle 1.5, 2.5, 1, 2 \rangle$	т/сут	ТНЧ, ТНИ
4	Δg_c	$\langle -5, -1.5, 1, 1 \rangle;$ $\langle 0, 1, 1 \rangle; \langle 1, 5, 1, 1 \rangle$	т/сут	ТНЧ, ТНИ
5	$\Delta N_{e\%}$	$\langle 45, 70, 1, 7 \rangle;$ $\langle 77, 6, 6 \rangle;$ $\langle 88, 95, 8, 5 \rangle$	%	ТНЧ, ТНИ
6	$\Delta N_{e\%}$	$\langle -10, -5, 1, 4 \rangle;$ $\langle 0, 3, 3 \rangle;$ $\langle 5, 10, 5, 1 \rangle$	%	ТНЧ, ТНИ
7	$\Delta \omega$	$\langle -5, -2.5, 1, 2 \rangle; \langle -1.5, 2, 1 \rangle;$ $\langle -0.5, 0.5, 0.5 \rangle; \langle 0, 0.5, 0.5 \rangle;$ $\langle 1, 0.7, 1.3 \rangle;$ $\langle 2, 1, 1, 6 \rangle; \langle 3.5, 4.5, 2.5, 3 \rangle$	Об/мин	ТНЧ, ТНИ

3.2. Построение базы правил нечёткой продукции

Если система способна переходить из одного состояния в другое, то говорят, что она обладает поведением. Этим понятием пользуются, когда неизвестны закономерности (правила) перехода из одного состояния в другое. Тогда говорят, что система обладает каким-то поведением и выясняют его характер, алгоритм. [1, 2, 4]

Продукционные системы (основанные на правилах) находят применение для вывода заключений в экспертных системах.

В общем виде продукция выражается, как:

$$(i): Q, P, A \Rightarrow B; N \quad (23)$$

где: i – номер правила, Q – сфера применения продукции, P – условие применения ядра продукции, A – условие / условия (антецедент), B – консеквент, N – постусловие продукции. [3]

В таблице 3 приведена база правил, а также матрица коэффициентов «значимости» правил, которая имеет вид:

$$F = \{\{F_1, F_2, F_3, \dots, F_m\}, i = \overline{1, M} \quad (24)$$

Таблица 3

Построение базы правил

(i)	$A \Rightarrow$	B	F
1	$\Delta v = \text{“NB” И } \Delta \Delta v = \text{“PS”}$	PM	0.8
2	$\Delta v = \text{“NS” И } \Delta \Delta v = \text{“PS”}$	PS	0.8
3	$\Delta v = \text{“Z” И } \Delta \Delta v = \text{“Z”}$	Z	0.8
4	$\Delta v = \text{“PS” И } \Delta \Delta v \neq \text{“N”}$	NS	0.8
5	$\Delta v = \text{“PS” И } \Delta \Delta v \neq \text{“Z”}$	NB	0.95
6	$g_c = \text{“Z” И } \Delta g_c = \text{“Z”}$	Z	0.9

7	"g _c " = "PS" И "Δg _c " ≠ "PS"	Z	0.9
8	"g _c " = "PB" И "Δg _c " ≠ "N"	NS	0.75
9	"N _{e%} " = "PS" И "ΔN _{e%} " = "Z"	NS	0.95
10	"N _{e%} " = "PS" И "ΔN _{e%} " = "PS"	NB	0.75
11	"ΔV" = "NS" И "g _c " = "Z" И "Δg _c " ≠ "PS" И "N _{e%} " ≠ "PS" И "ΔN _{e%} " ≠ "PS"	PM	1
12	"ΔV" = "NB" И "g _c " = "PS" И "Δg _c " ≠ "PS"	PB	1
13	"ΔV" = "Z" И "ΔΔV" ≠ "Z" И "N _{e%} " = "Z" И "ΔN _{e%} " = "PS"	Z	0.75
14	"ΔV" = "NS" И "g _c " = "PS" И "Δg _c " ≠ "PS"	PM	0.75
15	"g _c " ≠ "PB" И "N _{e%} " ≠ "PS" И "ΔN _{e%} " = "PS"	PS	0.8
16	"g _c " ≠ "PS" И "N _{e%} " ≠ "PS" И "ΔN _{e%} " = "PS"	PS	0.85
17	"ΔV" = "NS" И "ΔΔV" ≠ "PS" И "g _c " ≠ "PB" И "Δg _c " = "PS"	PM	0.95
18	"ΔV" = "NB" И "ΔΔV" ≠ "PS" И "g _c " ≠ "PS" И "Δg _c " = "PS"	PB	0.8
19	"ΔV" = "NS" И "g _c " ≠ "PB" И "Δg _c " ≠ "PS"	PM	0.9

3.3. Нечёткий вывод решения об изменении режима работы ГД

Для получения чёткого значения выходной переменной «B», которая сформирует управляющее воздействие Δω, применён метод центраоида.

Центр тяжести является, в некотором смысле, универсальным компромиссным решением. [6, 7] Поскольку вектор состояния и вектор решений заданы с помощью непрерывных функций, то центр тяжести может быть найден решением интегрального уравнения вида:

$$\Delta\omega = \frac{\int_{\min \Delta\omega}^{\max \Delta\omega} \Delta\omega \mu(\Delta\omega) d\Delta\omega}{\int_{\min \Delta\omega}^{\max \Delta\omega} \mu(\Delta\omega) d\Delta\omega} \quad (25)$$

где: $\Delta\omega = \left\{ \frac{\mu_1(\Delta\omega)}{\Delta\omega_1} + \frac{\mu_2(\Delta\omega)}{\Delta\omega_2} + \dots + \frac{\mu_n(\Delta\omega)}{\Delta\omega_n} \right\}$, а $\frac{\mu_n(\Delta\omega)}{\Delta\omega_n}$ – нечёткое множество.

В представленной модели предлагается использовать алгоритм импликации Т-типа по Мамдани (1974 г.), который состоит в определении значения истинности при обработке по сформулированным правилам [2, 7]:

$$A \Rightarrow B = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (26)$$

где: A – антецедент, B – консеквент.

На рисунках 5-7 представлены примеры нечёткого вывода при заданных начальных условиях, в статическом состоянии системы:

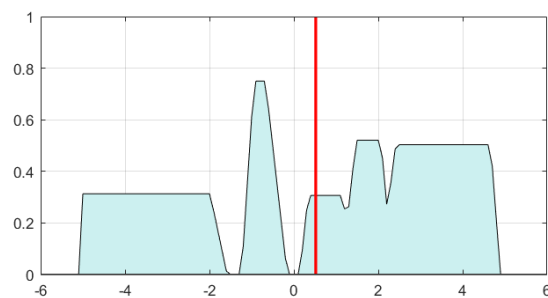


Рис. 5. Вывод решения об изменении режима работы A = { -3, 0, 31, 1, 86, 1 } ⇒ B(Δω) = {0.5}

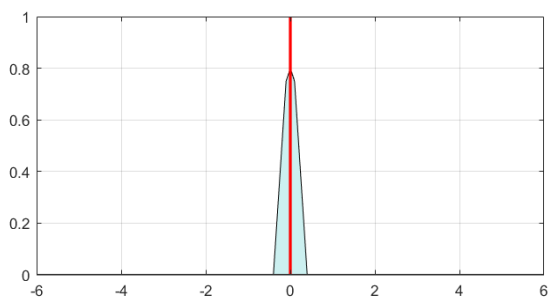


Рис. 6. Вывод решения об изменении режима работы A = { 0, 0, 26, 0, 60, 0 } ⇒ B(Δω) = {0}

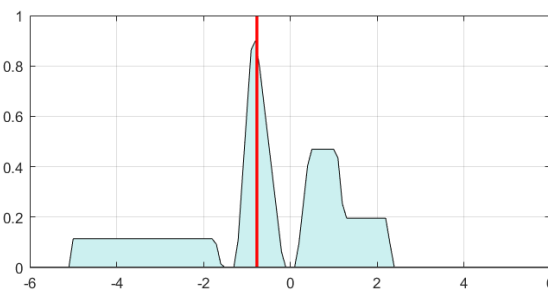


Рис. 7. Вывод решения об изменении режима работы A = { -2, 0, 35, 0, 90, 0 } ⇒ B(Δω) = {-0.8}

Статическая проверка выполнена для анализа адекватности выходных решений и их соответствия решениям судоводителя, при аналогичных входных переменных.

4. Нечёткое управление скоростным движением судна

Приведённая модель (рис.4) обладает инерционностью по всем рассмотренным переменным, поэтому необходимо выполнить моделирование системы в динамическом режиме. Численное моделирование выполнено в математической среде Matlab/Simulink. На рисунках 8-11 представлены результаты численного моделирования поведения интеллектуальной системы управления скоростным режимом судна. На рис. 8 видно, что установившийся режим достигается на t~410 с, что обусловлено ограничениями системы электронного управления, для обеспечения безопасности внутренней системы – ГД.

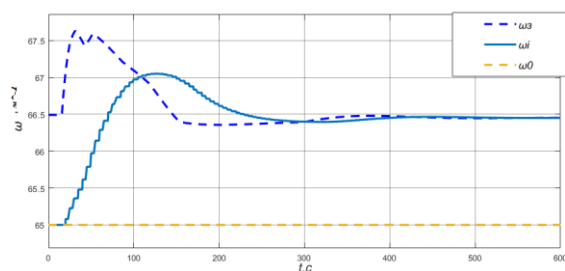


Рис. 8. Переходный процесс регулирования режима работы ГД. ω_0 - начальный режим работы, ω_i – исполнительное значение, ω_3 – решение, выработанное нечётким контроллером.

На рис 9. Видно, что не достигнуто значение заданной скорости, для обеспечения прихода судна в назначенное время, что связано со средой и решениями, выработанными нечётким контроллером.

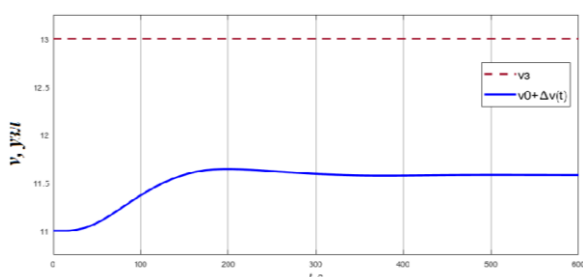


Рис. 9. Переходный процесс изменения скорости $v_0 + \Delta v(t)$, как отклика на $\Delta\omega$.

На рис. 10 показано, что в наблюдении за текущей $N_{e\%}$ присутствует шум, для увеличения значимости накопления приращений переменных (4, 5, 8) и придания сходства с реальной работой ГД.

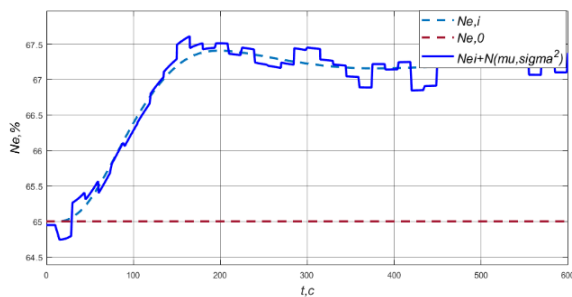


Рис. 10. Переходный процесс изменения $N_{e\%}$, как отклика на $\Delta\omega$.

На рисунке 11 представлен переходный процесс изменения расхода топлива. Величина $g_c(max)$ – максимальный суточный удельный расход топлива ГД, заданный в техническом задании чартер-партии.

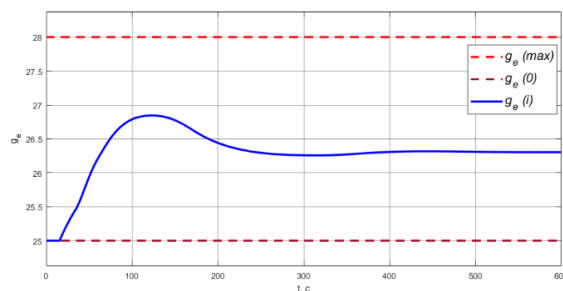


Рис. 11. Переходный процесс изменения g_c , как отклика на $\Delta\omega$.

На рисунке 12 показано выработанное решение $\Delta\omega$ нечётким контроллером для системы, с учётом динамики, достаточное для обеспечения установившегося состояния всей системы по всем переменным.

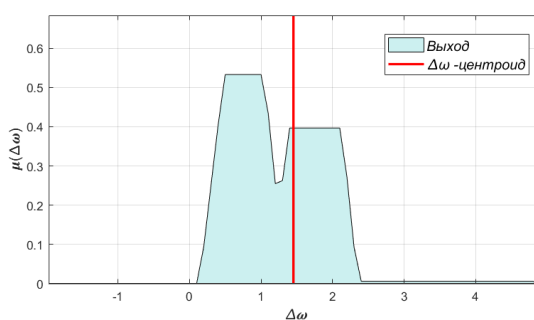


Рис. 12. Выработанное решение - дефазификация выходной лингвистической переменной $\Delta\omega$ для системы в установившемся режиме

В данном эксперименте продемонстрировано, что скоростной режим не обеспечен. Основными факторами, повлиявшими на $\Delta\omega$ являются: период интегрирования Δt для переменных $\Delta N_{e\%}$, Δg_c , $\Delta \Delta v$, а также резкое увеличение этих значений, при увеличении оборотов (рис. 10, 11). На основании этого, нечётким контроллером, выработано решение не увеличивать $\Delta\omega$ дальше, в целях безопасности внутренней системы и минимизации расхода бункерного топлива.

Заключение

Полученная модель может быть применена при проектировании автономных навигационных систем для МАНС. Отличительной особенностью рассмотренной нечёткой САУ является расстановка приоритетов в многокритериальном функционале качества и выработка компромиссных решений, в данном случае, между динамикой увеличения нагрузки ГД и заданной скоростью. Для достижения универсальности выработки решений необходимо доработать набор правил, подобрать коэффициенты значимости, а также разработать метод вычисления периода времени анализа наблюдений и их интегрирования.

Литература

1. Волкова В. Н., Денисов А.А. Теория систем и системный анализ: учебник для академического бакалавриата, 2-е изд., перераб., и доп. М.: Издательство Юрайт, 2014. — 616 с. Серия: Бакалавр. Академический курс.
2. ГОСТ Р МЭК 61131-7-2017 Контроллеры программируемые. Часть 7. Программирование нечеткого управления

3. Крутов В. И. Автоматическое регулирование и управление двигателями внутреннего сгорания: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания», 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989.—416 с: ил.
4. Зюльков В. М. Математическая логика и теория алгоритмов: учебное пособие. Томск: Эль Контент, 2015. — 236 с.
5. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.: ил.
6. Чернов, В. Г. Основы теории нечетких множеств: учеб. пособие Владимирского гос. ун-та. Владимир: Изд-во Владимирского. гос. ун-та, 2010. — 96 с. — ISBN 978-5-9984-0055-1.
7. Филатов В.И. Модель нечеткой системы поддержки принятия решений в задачах управления скоростью судна при следовании судна по оптимальному пути. Морские интеллектуальные технологии., Санкт-Петербург, 2022. — №1 (55) т.1. 2022, с. 180—186.
8. Mamdani E. N. Applications of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. IEEE Transactions on Computers, vol. 26, no. 12, 1977, p. 1182-1191.
9. Fuzzy sets and systems: Theory and applications. Academic Press 1980, Mathematics in Sciences and Engineering vol. 144. D. DUBOIS, H. PRADE.
10. Tien Anh Tran, X. P. Yan, Yupeng Yuan. Marine Engine Rotational Speed Control Automatic System Based on Fuzzy PID Logic Controller. 2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), August 8-10, 2017, Banff, Canada., P.1099 –1104.
11. Глушков С. В, Автоматическое управление курсом судна с использованием регулятора на нечеткой логике, Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 12. С. 32-36.
12. Дмитриев С.П. Нечеткий критерий в задаче интеллектуального управления движением судна. Гироскопия и навигация. 1998. № 2 (21). С. 47-51.
13. Лукашкин Г.Е. Построение системы автономного адаптивного управления судном на основе нечеткой логики. Транспортное дело России. 2019. № 5. С. 177-180.
14. Седова Н.А., Перечёсов В.С., Седов В.А. Удержание судна на курсе на базе нечеткой логики с учетом скорости судна. Автоматизация процессов управления. 2013. № 2 (32). С. 74-79.

References

1. Volkova V. N., Denisov A.A. Teoriya sistem i sistemnyy analiz: uchebnyy dlya akademicheskogo bakalavriata [Theory of System and System analysis], 2-е изд., перераб., i dop. М.: Izdatel'stvo Yurayt, 2014. — 616 s. Seriya: Bakalavr. Akademicheskiiy kurs.
2. GOST R MEK 61131-7-2017 Kontrollery programmiruemye. Chast' 7. Programmirovaniye nechetkogo upravleniya [Standards of programming Fuzzy controllers IIEEC].
3. Krutov V. I. Avtomaticheskoye regulirovaniye i upravleniye dvigateley vnutrennego sgoraniya: Uchebnyy dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po spetsial'nosti «Dvigateli vnutrennego sgoraniya» [Automatic Regulation of internal combustion Engines], 5-е изд., перераб. i dop. М.: Mashinostroeniye, 1989.—416 s: il.
4. Zyuz'kov V. M. Matematicheskaya logika i teoriya algoritmov: uchebnoye posobie [Mathematical Logic and Algorithms theory]. Tomsk: El' Kontent, 2015., 236 s.
5. Leonenkov A. V. Nechetkoye modelirovaniye v srede MATLAB i fuzzyTECH [Fuzzy modeling in Matlab and FuzzyTECH]. SPb.: BKhV-Peterburg, 2005. 736 s.: il.
6. Chernov, V. G. Osnovy teorii nechetkikh mnozhestv [Basics of Fuzzy logic Theory]. ucheb. posobie Vladimirskogo gos. un-t. Vladimir: Izd-vo Vladimirskogo. gos. un-ta, 2010. — 96 s. — ISBN 978-5-9984-0055-1.
7. Filatov V.I. Model' nechetkoy sistemy podderzhki prinyatiya resheniy v zadachakh upravleniya skorost'yu sudna pri sledovanii sudna po optimal'nomu puti [Fuzzy model of decision support system for ship's speed management in case of ship is following the optimal predicted path]. Morskoye intellektual'nyye tekhnologii., Sankt-Peterburg, 2022. — №1 (55) t.1. 2022, s. 180—186.
8. Mamdani E. N. Applications of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. IEEE Transactions on Computer's, vol. 26, no. 12, 1977, P. 1182-1191.
9. Fuzzy sets and systems: Theory and applications. Academic Press 1980, Mathematics in Sciences and Engineering vol. 144. D. DUBOIS, H. PRADE.
10. Tien Anh Tran, X. P. Yan, Yupeng Yuan. Marine Engine Rotational Speed Control Automatic System Based on Fuzzy PID Logic Controller. 2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), August 8-10, 2017, Banff, Canada., P.1099 –1104.
11. Glushkov S. V, Avtomaticheskoye upravleniye kursom sudna s ispol'zovaniem regul'yatora na nechetkoy logike. [Automatic Ship's course control with Fuzzy Logic] Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. 2007. № 12. S. 32-36.
12. Dmitriev S.P. Nechetkiy kriteriy v zadache intellektual'nogo upravleniya dvizheniem sudna. [Fuzzy criteria in the intellectual control of vessel's movement] Giroskopiya i navigatsiya. 1998. № 2 (21). S. 47-51.
13. Lukashkin G.E. Postroeniye sistemy avtonomnogo adaptivnogo upravleniya sudnom na osnove nechetkoy logiki. [Development of Automatic adaptive control of the Ship based on Fuzzy logic] Transportnoye delo Rossii. 2019. № 5. S. 177-180.
14. Sedova N.A., Perechegov V.S., Sedov V.A. Uderzhanie sudna na kurse na baze nechetkoy logiki s uchedom skorosti sudna. [Track control system based on fuzzy logic taken into account speed] Avtomatizatsiya protsessov upravleniya. 2013. № 2 (32). S. 74-79.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктор Иванович Филатов, преподаватель-исследователь, научный сотрудник, государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. E-mail: Filatov_viktor1994@mail.ru.

Viktor I. Filatov, post-graduate researcher, scientific staff, Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. E-mail: Filatov_viktor1994@mail.ru.

Вадим Викторович Астреин, доктор технических наук, капитан дальнего плавания, профессор кафедры «Судовождение», государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. E-mail: Astrein-vadim@rambler.ru.

Vadim V. Astrein, Dr. Sci. (Eng)s, Master Marine, Professor of the Department of Navigation, Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. E-mail: Astrein-vadim@rambler.ru.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.12.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 26.01.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 27.01.2023.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Научная статья

УДК 681.5; 517.935

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.033>

Онлайн прогноз времени присутствия с помощью а-профилей в задаче стабилизации курса АНПА

И.Ю. Липко¹ ivanlipko@yandex.ru, А.В.Титов² titov@asu.edu.ru

¹Севастопольский государственный университет,

²Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева

Аннотация Статья посвящена теме оценки времени присутствия автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) в положении, ограниченном заданным углом курса на примере управления АНПА при передаче данных в морской среде из АНПА на фиксированную платформу с помощью лазерного приёмо-передатчика. Цель статьи: осуществить качественный прогноз времени пребывания АНПА в заданном положении при действии внешних возмущающих факторов, что должно приводить к более эффективному использованию ограниченных ресурсов АНПА при передаче данных. Новизна заключается в использовании в алгоритмах прогноза нескольких а-профилей, содержащих траектории наиболее вероятного движения к заданным ограничениям и оценки времени движения вдоль них. Для решения задач используются методы теории больших уклонений, методы Монте-Карло, методы численного интегрирования дифференциальных уравнения. Траектории наиболее вероятного движения вычисляются аналитически. В статье приводятся результаты численного моделирования управления курсом АНПА MiddleAUV на приёмное устройство при действии внешних возмущений; оценки времени присутствия в заданных ограничениях курса соответствующие каждому моменту времени до выхода за ограничения; статистические метрики ошибок прогноза, которые свидетельствуют о достаточном качестве прогноза. Для 5 сек окна прогноза максимальная абсолютная ошибка составляет не более 0.5 сек.

Ключевые слова: оценка времени, стабилизация курса, время присутствия, большие уклонения, инстантон.

Для цитирования: Липко И.Ю., Титов А.В. Онлайн прогноз времени присутствия АНПА в заданном положении при его наведении на цель с помощью а-профилей, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 254—260. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.033

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.033>

Online estimation of time presence with a-profiles in the course keeping problem of AUV

Ivan U. Lipko¹ ivanlipko@yandex.ru, Alexey V. Titov² titov@asu.edu.ru

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

²Astrakhan State University name of V.N. Tatishcheva, Astrakhan, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the topic of estimating the presence time problem of an autonomous underwater vehicle (AUV) in a position limited by a given course angle. Methods described using the example of AUV control in the process of transmitting data in the marine environment from AUV to a fixed platform using a laser transceiver. The purpose of the article: to carry out a qualitative forecast of the time spent by the AUV in a given position under the action of external disturbing factors, which should lead to a more efficient use of the limited resources of the AUV when transmitting data. The novelty lies in the use of several a-profiles in prediction algorithms containing trajectories of the most probable movement to the specified constraints and estimates of the time of movement along them. Methods of the theory of large deviations, Monte Carlo methods, methods of numerical integration of differential equations are used to solve problems. The trajectories of the most probable movement are calculated analytically. The article presents the results of numerical simulation of the control of the AUV, named MiddleAUV, course on the receiving device under the action of external disturbances; estimates of the presence time in the specified limits of the course corresponding to each moment of time before going beyond the limits; statistical metrics of forecast errors, which indicate the sufficient quality of the forecast. For 5 seconds of the forecast window, the maximum absolute error is less than 0.5 seconds.

Key words: time estimate, course keeping, time presence, large deviation, instanton.

For citation: Ivan U. Lipko, AUV time presence online estimation with a-profiles in the course keeping problem, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 254—260. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.033

Введение

Статья посвящена вопросу оценки времени присутствия АНПА в положении, ограниченном

заданным углом курса. Оценка времени должна выполняться онлайн, т.е. в каждый момент функционирования системы.

Задача стабилизации положения любого подводного аппарата (ПА) встречается довольно часто: начиная от вопросов навигации и следования по заданному курсу, заканчивая стыковкой и соединением ПА в стыковочные модули, передачей данных и наблюдением за объектами. В последних случаях возникает и побочная задача удержания ПА в заданной ограниченной области фазовых координат: отслеживании, чтобы положение и ориентация корпуса судна находились в заданных границах.

В качестве примера конкретной задачи в этой статье предлагается рассмотреть пример управления АНПА при передаче данных в морской среде из АНПА на фиксированную платформу с помощью лазерного приёмо-передатчика.

Цель статьи: осуществить качественный прогноз времени пребывания АНПА в заданном положении при действии внешних возмущающих факторов, что должно приводить к более эффективному использованию ограниченных ресурсов АНПА при передаче данных. Новизна заключается в использовании в алгоритмах прогноза нескольких аппроксимаций, содержащих траектории наиболее вероятного движения к заданным ограничениям и оценки времени движения вдоль них. Для решения задач используются методы теории больших отклонений, методы Монте-Карло, методы численного интегрирования дифференциальных уравнения. Траектории наиболее вероятного движения вычисляются аналитически.

Дальнейшее содержание статьи включает обзор задач, в которых необходимо выполнять управление положением АНПА, и способов их решения, теоретическое описание предлагаемого метода оценки времени, описание используемой модели ПА, результаты численного моделирования и метрики качества оценки.

Актуальность задачи присутствия и удержания АНПА в заданном положении

Общая проблема навигации хорошо изучена и для её решения используются классические методы управления, которые опираются на математические модели ПА. Наиболее известные из них: линейно-квадратичный регулятор, скользящий регулятор, ПИД-регулятор. Они позволяют двигаться от точки к точке по заданному маршруту. Однако на практике возникают частные задачи, требующие более детального их рассмотрения и решения для конкретного случая и конкретного подводного аппарата. Так, например одной из таких частных задач является передача данных в подводной среде.

Передача данных в подводной среде в основном осуществляется между подвижными подводными аппаратами (ПА), подвижными ПА и стационарными подводными станциями, подвижными ПА и подвижными надводными станциями (судами). Основными способами передачи данных под водой являются: гидроакустические и оптические. Первые позволяют передавать данные малого объёма на большие расстояния, а вторые большие объёмы, но ограничены по расстоянию. Например, авторы работы [1] получили скорость передачи данных в 80 кб/с на расстоянии 510 м гидроакустическим

способом и большей скорости на расстояние до 20 м с помощью лазера с 10 МГц шириной полосы.

Передача данных в подводной среде связана со множеством факторов, связанных с передающей средой, передатчиком и приёмником, действующих на них возмущений. ПА функционируют в неизвестной постоянно меняющейся среде, что приводит к непрерывному изменению их положения и ориентации. Поэтому, например, использование магнитоиндукционных средств связи между ПА и другими подводными устройствами не является стабильным и надёжным: время, необходимое для коммуникации, очень сильно ограничено [2]. ПА должен находиться в заданном положении и обеспечивать приемлемое расстояние между приёмо-передающими устройствами в течении всего сеанса связи. Отклонения ПА на относительно большие расстояния, изменения ориентации приводят к уменьшению скорости передачи или даже прерыванию сеанса связи, после чего необходимо повторять передачу данных.

Статья [3] содержит обзор подводных оптических беспроводных средств связи. Авторы представляют исчерпывающий обзор проблем, достижений и перспектив развивающихся оптических беспроводных сетей. Были выделены типы подводных аппаратов, предпочтительных для выполнения задач передачи данных. Подводная оптическая и магнитоиндукционная связь не могут обеспечить связь на большие расстояния.

В работе [4] приводятся примеры лазерных пучков, спроецированных на поверхности лазерных приёмников. Ориентируясь на их размеры, можно оценивать ограничения, накладываемые на ориентацию ПА в пространстве.

Управление ПА сводится к задачам навигации и стыковки: сначала необходимо выполнить приведение ПА в зону сеанса связи, затем стыковка, включающая вход и выход ПА, ориентирование его корпуса, касание и т.п. Таким образом, стыковка АНПА является другим примером, когда необходимо выдерживать заданные ограничения на положение корпуса.

Например, в работах [5, 6] описываются контуры управления навигацией и стыковкой ПА. Стыковочная станция выполнена таким образом, чтобы выполнять зарядку и обмен данными, позволяя АНПА оперировать независимо от надводных судов в широкие интервалы времени. Более интересная задача возникает в случае, когда платформа является подвижной, например, как в [7], где надводное судно должно на ходу подобрать ПА.

Качество выполнения задач ориентации корпуса ПА связано с применяемыми датчиками. В частности, некоторые авторы [8, 9] предлагают применять видеоканал для управления и мониторинга положения и курса ПА, для выполнения входа в стыковочную станцию и стыковки внутри [10]. Это реализовано с использованием специальных маркеров. Известны полномасштабные эксперименты, выполненные в морской среде [11]. Предложенное решение содержит этап обнаружения маркеров на корпусе стыковочной станции, фазу оценки положения ПА и его ориентации относительно маркеров.

Круг описанных выше задач управления, передачи данных содержит определённые риски их

успешного выполнения. Для предотвращения или снижения эффекта этих рисков некоторые авторы [12, 13] предлагают оценивать отклонения, потому что в большинстве случаев невозможно мгновенно передавать информацию между частями технической системы. В частности, описываемый ниже способ может быть также использован для оценки риска выполнения задач.

Таким образом, сама по себе задача стабилизации является известной и решаемой для конкретных ПА, но актуальной в связи с появлением новых задач, выполняемых ПА, так и для вновь создаваемых ПА, и АНПА, в частности. Успешность выполнения задач в той или иной степени связаны с управлением. Вопрос прогноза рисков и оценки нахождения ПА в заданной фазовой области также имеет место.

Теоретическая часть

Постановка задачи

Пусть задана система дифференциальных уравнений, описывающая поведение изучаемого ПА

$$\dot{x} = Ax + \sigma \xi(t), x(0) = x_0, \quad (1)$$

где x – вектор состояния, A – матрица системы, σ – волатильность, образующая матрицу диффузии $a = \sigma \sigma^T$, $\xi(t)$ – гауссовский белый шум, x_0 – начальное состояние.

Задано пороговое значение x_{thr} , которое состояние объекта x_c не должно превышать. По сути, порог x_{thr} разделяет фазовую плоскость на безопасную область функционирования E и опасную D (рис. 1).

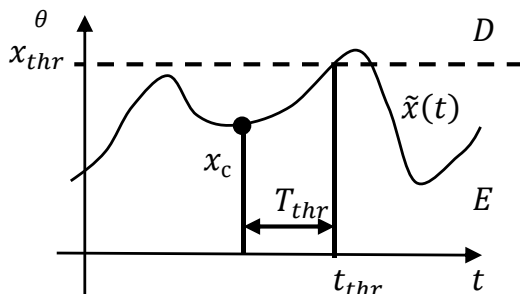


Рис. 1. Текущее состояние и окно прогноза

Необходимо в текущий момент времени t_c для состояния объекта $x_c(t_c)$ оценить время T_{thr} , которое осталось до момента времени t_i , когда состояние $x_c(t_i)$ превысит заданный уровень x_{thr} .

Решение задачи оценки времени состоит из следующих шагов: получение наиболее вероятных траекторий движения (инстантонов) к нескольким порогам, формирование а-профилей к порогам, проецирование на а-профили текущего состояния.

Гипотеза такого решения строится на том факте, что пересечение порога x_{thr} происходит по траекториям вдоль инстантона к этому порогу. В худших случаях пересечение происходит вдоль инстантонов к порогам $x_{thr_N} > x_{thr_{N-1}} > \dots > x_{thr_1} > x_{thr_0} = x_{thr}$, которые стоят выше, чем x_{thr} . Следовательно, зная инстантоны можно делать оценку положения текущего состояния относительно инстантонов и фиксировать время, которое осталось на инстантоне до положения порога. Инстантон – это

траектория наихудшего случая развития событий, т.е. получаемая оценка времени является оценкой снизу – для наихудшего случая.

Инстантон и а-профиль

Получение инстантонов может быть проведено несколькими способами. Самый очевидный из них является применение метода Монте-Карло, заключающийся в многократном моделировании и отборе траекторий, превысивших порог x_c . Поскольку объект представлен в виде дифференциального уравнения, можно воспользоваться теорией больших уклонений и построить инстантон аналитически.

В уравнение объекта (1) вводится малый параметр:

$$\dot{x} = Ax + \varepsilon \sigma \xi(t), x(0) = x_0, \quad (2)$$

где ε – малый параметр. Для (2) решается задача минимизации для случая бесконечного слева времени и выхода из аттрактора

$$x^* = \arg \min_{x(-\infty)=0, x(0)=x_{\Pi}} V(O, x_{\Pi}), \quad (3)$$

где $V(O, x_{\Pi}) = V(\infty, O, x_{\Pi})$ – квазипотенциал.

Результат (3) имеет смысл ввиду того, что для системы (2) известна [14] оценка вероятности пересечения траектории области D

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon^2 P(x \in D) = - \min_{y \in D \cup \partial D} V(t, x, y), \quad (4)$$

где $V(t, x, y) = \min_{\varphi_0=x, \varphi_t=y} S_t(\varphi)$ – квазипотенциал из состояния x в состояние y в течении времени t [15, 16], функционал действия $S_T = \int_0^T (\dot{x} - f(x, t))^T \sigma \sigma^T (\dot{x} - f(x, t)) dt$.

А-профиль это кортеж, включающий в себя инстантон и время, оставшееся до достижения порогового состояния. Поскольку задача решается численно, то мы имеем дискретные представления для инстантона, а его длина ограничена.

Алгоритм оценки времени T_{thr}

Рассмотрим случай, когда оценка времени T_{thr} выполняется с использованием одного а-профиля. Оценка производится путём проецирования текущего состояния на инстантон:

$$T_{thr} = T - \operatorname{argmin}_{t \in [0, T]} \|x_c - x^*(t)\|, \quad (5)$$

где T – это время, на котором мы ограничиваем решение задачи (3), поскольку достижение аттрактора возможно только в бесконечности.

Поскольку пересечение может происходить также и вдоль более дальних порогов $x_{thr_N} > x_{thr_{N-1}} > \dots > x_{thr_1} > x_{thr_0} = x_{thr}$, принадлежащих множеству инстантонов X^* , то разумно проводить оценку вдоль соответствующих инстантонов. Решение задачи с несколькими а-профилями идентично решению задачи (5) с одним а-профилем, только поиск должен выполняться не только по времени, но и по инстантонам:

$$T_{thr} = T - \operatorname{argmin}_{x^* \in X^*} \operatorname{argmin}_{t \in [0, T]} \|x_c - x^*(t)\|. \quad (6)$$

Результаты

Модель АНПА

Для демонстрации результатов работы алгоритма оценки времени используется математическая модель горизонтального движения АНПА "MiddleAUUV" [17] производства ООО "Центр Робототехники", г. Владивосток. АНПА MiddleAUUV

(рис. 2) предназначен для исследования алгоритмов управления и обработки видеoinформации от фронтальной и донной камер. Аппарат имеет 4 винта: по паре для вертикального и горизонтального движения. Аппарат оборудован бортовым компьютером на базе Raspberry PI Compute module 4. Габаритные размеры в коробке – (Д x Ш x В) 380 x 285 x 285 мм. Вес нетто – 1 кг. Тяга одного двигателя: до 0,2 кгс (при 12 В). Глубина погружения: до 10 м.



Рис. 2. Общий вид АНПА "MiddleAUV"

Математическая модель горизонтального движения известна в виде передаточных функций от команд управления левым и правым моторами до угловой скорости:

$$\omega_L(s) = \frac{0.09937s + 0.002391}{s^2 + 0.6365s + 0.01044} \quad (7)$$

$$\omega_R(s) = \frac{-0.06789s - 0.001905}{s^2 + 0.6561s + 0.01234} \quad (8)$$

и от команд управления левым и правым моторами до линейных скоростей:

$$V_L(s) = \frac{-0.0197s + 0.002171}{s^2 + 0.3246s} \quad (9)$$

$$V_R(s) = \frac{-0.06789s - 0.001905}{s^2 + 0.2563s + 0.0037} \quad (10)$$

Используя эти передаточные функции, была сформирована система вида (1), включающая в вектор состояния курс, скорость угла курса, линейные скорости горизонтального движения. Матрица A включает контур управления для стабилизации курса, а итоговая модель получается 10-го порядка. В качестве управления применяется ПИД-регулятор.

Симулирование

Для полученной математической модели АНПА были вычислены инстантоны к разным порогам, включая основной порог в 5° и соответствующие оценки квазипотенциалов в каждый отсчёт времени (рис. 3). Движение к порогам происходит с похожей скоростью изменения курсового угла.

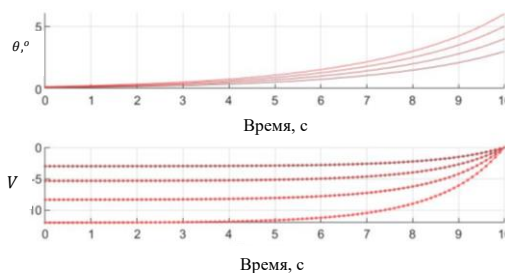


Рис. 3. Инстантоны к разным порогам и соответствующие им оценки квазипотенциалов в каждый момент времени

Для проверки алгоритма оценки оставшегося времени было просимулировано движение АНПА к порогу $x_{thr} = 5^\circ$ и отобрано 500 траекторий, пересекающих его за 15 секунд.

На рис. 4 можно увидеть эти траектории, начинающиеся в нулевом положении, в сравнении с инстантоном к порогу x_{thr} . Траектории проходят вдоль инстантона, и чем ближе к порогу, тем ближе к инстантону. Некоторые траектории проходят выше инстантона, что происходит по описанной выше причине: они идут вдоль инстантонов к более высоким порогам.

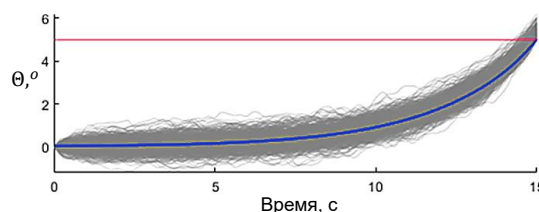


Рис. 4. Симулированные траектории методом Монте-Карло (серым) в сравнении с инстантоном (синим) к порогу (красным) в 5°

Сравнение и обсуждение

Результаты оценки времени, оставшегося до пересечения порога в 5 градусов, графически показаны на рис. (5а). Ось абсцисс указывает фактическое время, оставшееся до достижения порогового значения, а ось ординат указывает оценку T_{thr} ; красная линия – некоторый идеальный прогноз, для которого оценка равна фактическому времени. Первое, что бросается в глаза – это ограничение прогноза сверху. Алгоритм не возвращает оценки времени, превышающие 6.23 секунды. Это ограничение продиктовано общим временем, которое может быть получено из самой удаленной точки во всем семействе а-профилей. Если обратится к рисунку с семейством инстантонов (рис.3), то можно увидеть, что до 3-4 секунд траектории ещё достаточно близки друг к другу и способность различить траектории между собой не такая высокая, как далее.

Для таких оценок вполне разумно использовать фильтрацию, например, медианную в бегущем окне. Это показано на рисунке (5b). Каждая оценка становится менее "дерганой", что субъективно выглядит лучше. В то же время следует отметить, что оценки малых времен (менее 1 секунды) становятся завышенными.

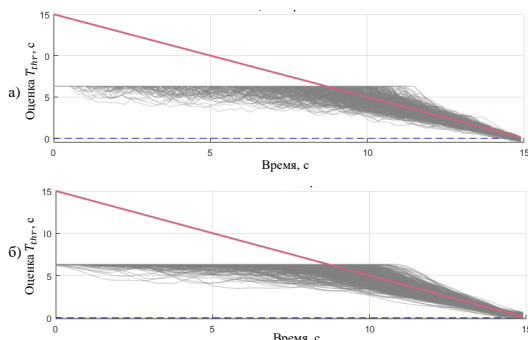


Рис. 5. Оценки времени для траекторий (серым) в сравнении с идеальным прогнозом (красным); а – сырые оценки, б – сглаженные оценки

Другой аспект обуславливает ограниченность горизонта прогноза – сама задача прогноза таких событий. Объект находится подавляющее время функционирования в фазовой области E , близкой к порогу. При этом, близость к порогу не определяет однозначно и линейно время, через которое этот порог будет пересечён. Так на рис. 6 представлена плотность траекторий и зависимость времени до пересечения порога угла курса в $x_{thr} = 5.5$. Продолжительное время функционирования ПА совершает колебания до 2 градусов. Есть случаи, когда амплитуда больше, но порог не достигается. И только на интервалах времени до 5 с происходит быстрое пресечение порога.

Посмотрим теперь на оценки времени и соответствующие состояния на траекториях подробнее (рис.7). Если сравнивать прогнозируемое время, то за 2 секунды до пересечения порога, в худшем случае, траектория была на уровне примерно 3.86 градуса отклонения, за 1 секунду до этого – на уровне 4.6 градуса отклонения (рис. 7а). Соответствующие оценки времени составляют 3.28 с и 1.68 с. Первая оценка все еще кажется вполне нормальной, но вторая оценка довольно велика по сравнению с истинным временем. Это один из плохих случаев. Большинство траекторий за 1 секунду до пересечения имеют оценки, близкие или меньшие, чем фактическое оставшееся время. Если оценка ниже реальной, то мы считаем это хорошим результатом.

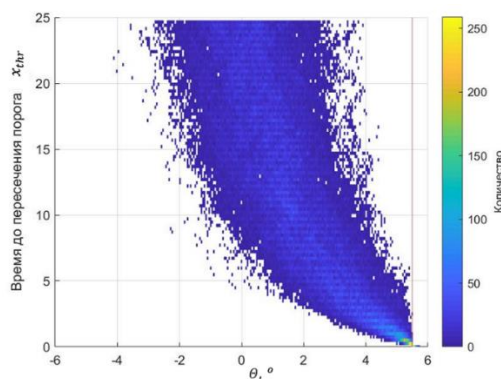


Рис. 6. Плотность траекторий и времени при движении к порогу курса в 5.5°

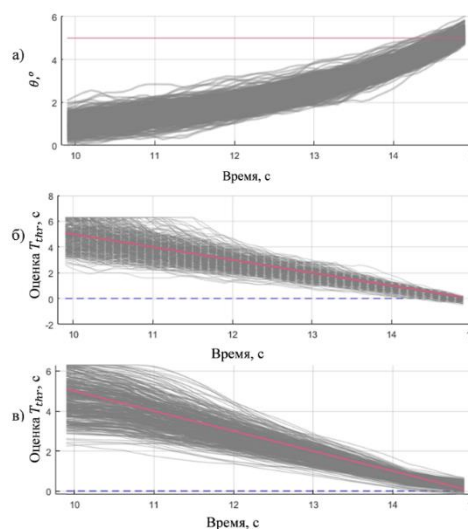


Рис. 7. Траектории (а) и соответствующие им оценки времени в каждый момент времени (б – сырые оценки, в – сглаженные оценки) в сравнении с идеальным прогнозом (красным) на 5-секундном интервале времени перед пересечением порога в 5°

Обратимся к числовым метрикам качества оценок: максимальная абсолютная оценка (maximum absolute error, MAE) и среднеквадратическая ошибка (mean square error, MSE). Таблица 1 даёт общую информацию о метриках для разных интервалов прогноза времени, оставшегося до пересечения порога. Так сравнивается сырая оценка времени с фильтрованными данными. Фильтрация даёт немного лучшую оценку. Поскольку оценка ограничена сверху на уровне 6.23 с, то очевидно, что в 15-ти секундном окне метрики будут показывать плохой результат. Для окон размером в 2 - 10 с метрики гораздо лучше. Для сравнения были попытки построить оценщики, основанные на алгоритмах линейной регрессии, деревьев решений, которые привели к плохим результатам, особенно, когда в качестве признаков использовалось только текущее состояние ПА.

Время обработки алгоритма в онлайн-режиме складывается из времени, затраченного на проецирование на семейство а-профилей, на вычисление оценки и работу фильтра. Среднее время работы на компьютере с процессором 3 ГГц составляет менее 0,001 секунды.

Таблица 1

Метрики качества оценок

Окно времени, с / Режим	MAE	MSE
15 / Сырая	2,85	15,54
15 / Фильтр	2,83	15,50
10 / Сырая	1,16	2,62
10 / Фильтр	1,13	2,56
5 / Сырая	0,47	0,41
5 / Фильтр	0,44	0,35
2 / Сырая	0,25	0,10
2 / Фильтр	0,27	0,12

Заключение

Для модели автономного подводного аппарата были построены а-профили, включающие инстантоны и оценки времени, оставшиеся до пересечения заданного порога отклонения курса; построен оценщик, основанный на алгоритме проецирования на несколько а-профилей, ведущих к нескольким пороговым значениям. Для подводного аппарата с ПИД-регулятором курсового угла удалось получить хорошие оценки времени в окне прогноза продолжительностью до 5-7 секунд.

Представленные результаты подтверждают возможность использования алгоритма, основанного на проецировании на несколько а-профилей, для оценки времени, оставшегося до пересечения заданного порога. Алгоритм может быть использован не только для оценки времени присутствия АНПА, но и в других областях, где необходимо решать подобные задачи.

Литература

1. Yoshida H. et al. Study on land-to-underwater communication, 2011 The 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, 2011, pp. 1-5.
2. Wei D. et al. Dynamic Magnetic Induction Wireless Communications for Autonomous-Underwater-Vehicle-Assisted Underwater IoT, IEEE Internet of Things Journal, vol. 7, no. 10, pp. 9834-9845, Oct. 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.2997709.
3. Saeed N., Abdulkadir C., Tareq Al-N., Mohamed-Slim A. Underwater Optical Wireless Communications, Networking, and Localization: A Survey. 2018.
4. Мартынов В.Л. Методология повышения эффективности подводных аппаратов/ В. Л. Мартынов. - СПб.: Мор. подвод. оружие - Гидроприбор, 2016. - 258 с.: ил.
5. McEwen R. S., Hobson B. W., McBride L., Bellingham J. G., Docking Control System for a 54-cm-Diameter (21-in) AUV, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 33, no. 4, pp. 550-562, Oct. 2008, doi:10.1109/JOE.2008.2005348.
6. Половко С.А., Проценюк А.С., Целуйко В.В. Опыт создания системы подводной стыковки для организации совместных действий. Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника». СПб: ООО Типография Фурсова, 2022. – 358.
7. Kabanov A., Kramar V., Lipko I. Motion Control of Catamaran-type Floating Station for Gripping the AUV, 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271581.
8. Pan-Mook L., Bong-Hwan J., Sea-Moon K. Visual servoing for underwater docking of an autonomous underwater vehicle with one camera, OCEANS 2003. Proceedings, 2003, pp. 677-682 Vol. 2.
9. Park J.-Y., Jun B.-h., Lee P.-m., Oh J. Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera, Ocean Engineering, vol. 36, pp. 48-61. 2009.
10. Yahya M. F., Arshad M. R., Image-based visual servoing for docking of an autonomous underwater vehicle, 2017 IEEE 7th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS), 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/USYS.2017.8309453.
11. Liu S., Xu H., Lin Y., Gao L. Visual Navigation for Recovering an AUV by Another AUV in Shallow Water. Sensors 2019, 19, 1889. Doi:10.3390/s19081889.
12. Fletcher B. et al. From the lab to the ocean: Characterizing the critical docking parameters for a free-floating dock with a REMUS 600. OCEANS 2017 - Anchorage, 2017, pp. 1-7.
13. Zhang R., Liu G., Li X. Real Time Path Predicting for Autonomous Underwater Vehicle Using Support Vector Regression Machines. 2008 Fourth International Conference on Natural Computation, 2008, pp. 414-416, doi: 10.1109/ICNC.2008.380.
14. Вентцель А.Д., Фрейдлин М.И. Флуктуации в динамических системах под действием малых случайных возмущений. – М.: Наука, 1979. 424 с.
15. Grafke T., Vanden-Eijnden E. Numerical computation of rare events via large deviation theory. 2018.
16. Touchette H. The large deviation approach to statistical mechanics. 2009.
17. Lipko I. Identification of the Horizontal Movement of the Underwater Vehicle MiddleAUV, 2022 International Russian Automation Conference, 2022, pp. 820-825, doi: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896256.

References

1. Yoshida H. et al., Study on land-to-underwater communication, 2011 The 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, 2011, pp. 1-5.
2. Wei D. et al., Dynamic Magnetic Induction Wireless Communications for Autonomous-Underwater-Vehicle-Assisted Underwater IoT, IEEE Internet of Things Journal, vol. 7, no. 10, pp. 9834-9845, Oct. 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.2997709.

3. Saeed N., Abdulkadir C., Tareq Al-N., Mohamed-Slim A. Underwater Optical Wireless Communications, Networking, and Localization: A Survey. 2018.
4. Martynov V.L. Metodologija povysenija jeffektivnosti podvodnyh apparatov [Methods to improve underwater vehicles effectiveness]. SPb.: Mor. podvod. oruzhie - Hidropribor, 2016. - 258 p.
5. McEwen R. S., Hobson B. W., McBride L., Bellingham J. G., Docking Control System for a 54-cm-Diameter (21-in) AUV, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 33, no. 4, pp. 550-562, Oct. 2008, doi:10.1109/JOE.2008.2005348.
6. Polovko S.A., Procenjuk A.S., Celujko V.V. Opyt sozdaniya sistemy podvodnoj stykovki dlja organizacii sovmestnyh dejstvij [From the design experience of underwater docking system for organizing joint actions]. Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Jekstremal'naja robototehnika». SPb: OOO Tipografija Fursova, 2022. 358 p.
7. Kabanov A., Kramar V., Lipko I., Motion Control of Catamaran-type Floating Station for Gripping the AUV, 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271581.
8. Pan-Mook L., Bong-Hwan J., Sea-Moon K., Visual servoing for underwater docking of an autonomous underwater vehicle with one camera, OCEANS 2003. Proceedings, 2003, pp. 677-682 Vol. 2.
9. Park J.-Y., Jun B.-h., Lee P.-m., Oh J., Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera, Ocean Engineering, vol. 36, pp. 48-61. 2009.
10. Yahya M. F., Arshad M. R., Image-based visual servoing for docking of an autonomous underwater vehicle, 2017 IEEE 7th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS), 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/USYS.2017.8309453.
11. Liu S., Xu H., Lin Y., Gao L. Visual Navigation for Recovering an AUV by Another AUV in Shallow Water. Sensors 2019, 19, 1889. Doi:10.3390/s19081889.
12. Fletcher B. et al. From the lab to the ocean: Characterizing the critical docking parameters for a free-floating dock with a REMUS 600. OCEANS 2017 - Anchorage, 2017, pp. 1-7.
13. Zhang R., Liu G., Li X. Real Time Path Predicting for Autonomous Underwater Vehicle Using Support Vector Regression Machines. 2008 Fourth International Conference on Natural Computation, 2008, pp. 414-416, doi: 10.1109/ICNC.2008.380.
14. Ventcel' A.D., Frejdlin M.I. Fluktuacii v dinamicheskikh sistemah pod dejstviem malyh sluchajnyh vozmushhenij [Fluctuations in dynamical systems under small random perturbations]. M.: Nauka, 1979. 424 p.
15. Grafke T., Vanden-Eijnden E. Numerical computation of rare events via large deviation theory. 2018.
16. Touchette H. The large deviation approach to statistical mechanics. 2009.
17. Lipko I., Identification of the Horizontal Movement of the Underwater Vehicle MiddleAUV, 2022 International Russian Automation Conference, 2022, pp. 820-825, doi: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896256.

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

Иван Юрьевич Липко, старший преподаватель кафедры «Информатика и управление в технических системах», научный сотрудник НИЛ «Робототехника и интеллектуальные системы управления», Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: ivanlipko@yandex.ru

Ivan U. Lipko, Senior Lecturer of the Department of Informatics and Control in Technical Systems, Research Officer of Scientific Laboratory "Robotics and intelligent control systems", Sevastopol State University, Universitetskaya str, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: ivanlipko@yandex.ru

Алексей Валерьевич Титов, кандидат технических наук, проректор по цифровизации, инновациям и приоритетным проектам, Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева (АГУ им. В.Н.Татищева), 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, titov@asu.edu.ru

Alexey V. Titov, Ph.D. (Eng), Vice-Rector for Digitalization, Innovations and Priority Projects, Astrakhan State University name of V.N. Tatishcheva, Tatishcheva St., 20a, Astrakhan, 414056, Russian Federation, titov@asu.edu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 28.11.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.12.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 25.12.2022.

Научная статья

УДК 62.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.034>

Влияние качки на точность горизонтальных смещений судна

А.А. Кабанов¹ kabanovaleksey@gmail.com, В.А. Крамарь¹ kramarv@mail.ru, А.В. Титов² titov@asu.edu.ru¹Севастопольский государственный университет,²Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева

Аннотация. В ходе выполнения подводных работ возникают задачи увеличения времени выполнения операций автономными подводными аппаратами. С этой целью рассматривается использование плавучих платформ (судов катамаранного типа) для транспортировки, подбора и перезарядки автономных подводных аппаратов. При выполнении этой операции к плавучим станциям предъявляются высокие требования к измерительному комплексу, входящему в состав системы автоматического удержания, который должен обеспечивать заданную точность. Анализ показал, что качка судна существенно влияет на точность расчета горизонтальных перемещений. С этой целью в статье проводится анализ влияния бортовой качки судна на точность горизонтальных перемещений. Для реализации, поставленной задачи в работе построена упрощенная математическая модель горизонтальных смещений судна – платформы относительно подводного маяка в связанной с платформой системе координат, которые не учитывают качку платформы. Оценено влияние гидроакустических параметров на выбор сигнала буй – ориентира.

Ключевые слова: судно, плавучая станция, автономный необитаемый подводный аппарат, качка, горизонтальные перемещения, буй - ориентир.

Для цитирования: Кабанов А.А., Крамарь В.А., Титов А.В. Влияние качки на точность горизонтальных смещений судна, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 261—267. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.034

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.034>

Influence of pitching on the accuracy of horizontal displacements of the vessel

Aleksey A. Kabanov¹ kabanovaleksey@gmail.com, Vadim A. Kramar¹ kramarv@mail.ru,Alexey V. Titov² titov@asu.edu.ru¹Sevastopol State University,²Astrakhan State University name of V.N. Tatishcheva, Astrakhan, Russian Federation

Abstract. In the course of underwater work, the tasks of increasing the time for performing operations by autonomous underwater vehicles arise. For this purpose, the use of floating platforms (catamaran-type ships) for transportation, pickup and reloading of autonomous underwater vehicles is being considered. When performing this operation, floating stations are subject to high requirements for the measuring complex, which is part of the automatic holding system, which must provide the specified accuracy. The analysis showed that the ship's roll significantly affects the accuracy of the calculation of horizontal displacements. For this purpose, the article analyzes the influence of the ship's roll on the accuracy of horizontal movements. To implement the task in view, a simplified mathematical model of the horizontal displacements of the ship-platform relative to the underwater beacon in the coordinate system associated with the platform is constructed in the work, which do not take into account the rolling of the platform. The influence of hydroacoustic parameters on the choice of the buoy signal is estimated.

Key words: vessel, floating station, autonomous underwater vehicle, pitching, horizontal movements, landmark buoy.

For citation: Aleksey A. Kabanov, Vadim A. Kramar, Alexey V. Titov, Influence of pitching on the accuracy of horizontal displacements of the vessel. 2023. № 1 part 1, P. 261—267. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.034

Введение

Интенсивное применение автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) приводит к необходимости повышения их эксплуатационных характеристик, расширения функциональных возможностей. [1,2,3,4]. Это приводит к необходимости увеличения их ресурса работы.

Для этого создаются плавучие станции, позволяющие реализовать сценарии транспортировки, подбора и подзарядки автономных подводных аппаратов. Это позволяет расходовать заряд батарей только при выполнении непосредственно работ и не покидать АНПА зону

выполнения работ, что существенно снижает требования к элементам питания. [5]

Выполнение ряда работ плавучего основания (судна) требует удержание судна в заданной точке в некоторых пределах [5]. Таким образом, измерительный комплекс совместно с системой автоматического удержания должны обеспечивать заданную точность.

Пеленгование береговых ориентиров, обеспечивающее достаточно высокую точность определения места, не может быть использовано в удаленных от берега районах.

В настоящее время существуют следующие системы определения положения судна в открытом море: радиолокационные системы с наземными

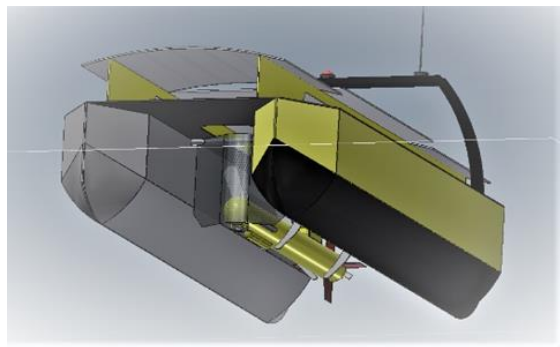
ориентирами; спутниковые радионавигационные системы; инерциальные навигационные системы; астронавигационные системы.

Специфика взаимодействия платформы с подводным аппаратом – малые допустимые перемещения судна – позволяют использовать гидроакустические методы.

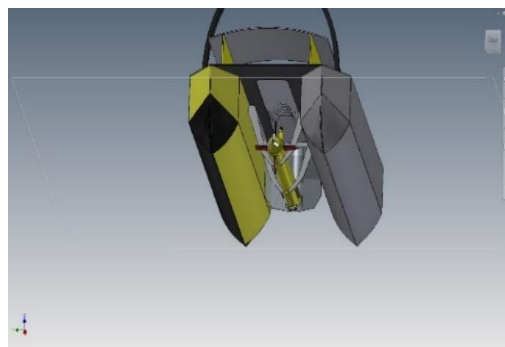
Гидроакустические методы позволяют просто реализовать автономные системы определения положения плавучего основания относительно заданной точки.

При использовании способа отображения точек на поверхности моря, соответствующих определенным точкам морского дна, на дне устанавливаются узконаправленный гидроакустический излучатель. В фокусе излучателя наблюдается интенсивное «кипение» поверхностного слоя воды. Смещение судна может быть определено по расстоянию до образующегося на поверхности моря пятна. Недостатком метода является высокая мощность, потребляемая подводным излучателем (что, очевидно, ограничивает глубины применения) и сложность построения автоматического измерительного комплекса. Для определения местоположения могут быть использованы методы гидролокации близко расположенных объектов (объекта), координаты которых не изменяются с течением времени (либо всегда известны). Такими ориентирами в открытом море могут быть донные (придонные) заякоренные объекты (гидроакустические маяки), на местоположение которых практически не влияют различные возмущающие факторы (ветер, течение, волнение моря). Гидролокационные системы позволяют определять положение судна практически на любых возможных глубинах. Однако, глубины и радиус действия системы ограничиваются затуханием гидроакустического сигнала и мощностью передатчика. При большой удельной мощности проявляется эффект кавитационного кипения на поверхности излучателя, что снижает долю энергии, превращающуюся в полезный сигнал.

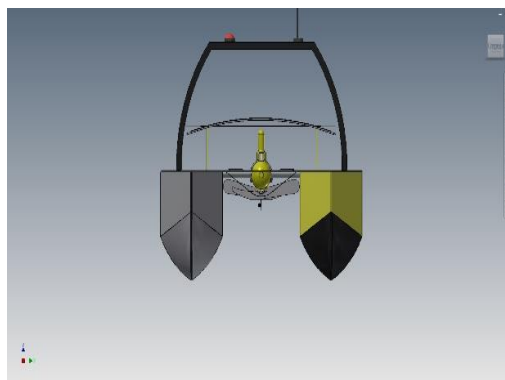
В настоящее время в качестве плавучих станций используются либо понтоны, либо суда катамаранного типа (рис. 1) [6, 7, 8, 9, 10].



а)



б)



в)

Рис. 1. Плавучая станция для АНПА в виде катамарана а) общий вид платформы и АНПА; б) начало захвата АНПА; в) окончание операции по захвату АНПА

Выполнение ряда работ плавучего основания (судна) требует удержание судна в заданной точке в некоторых пределах [5]. Таким образом, измерительный комплекс совместно с системой автоматического удержания должны обеспечивать заданную точность.

Пеленгование береговых ориентиров, обеспечивающее достаточно высокую точность определения места, не может быть использовано в удаленных от берега районах.

В настоящее время существуют следующие системы определения положения судна в открытом море: радиолокационные системы с наземными ориентирами; спутниковые радионавигационные системы; инерциальные навигационные системы; астронавигационные системы.

Специфика взаимодействия платформы с подводным аппаратом – малые допустимые перемещения судна – позволяют использовать гидроакустические методы. Типовая схема гидроакустического маяка-ответчика показана на рис.2.

Гидроакустические методы позволяют просто реализовать автономные системы определения положения плавучего основания относительно заданной точки.

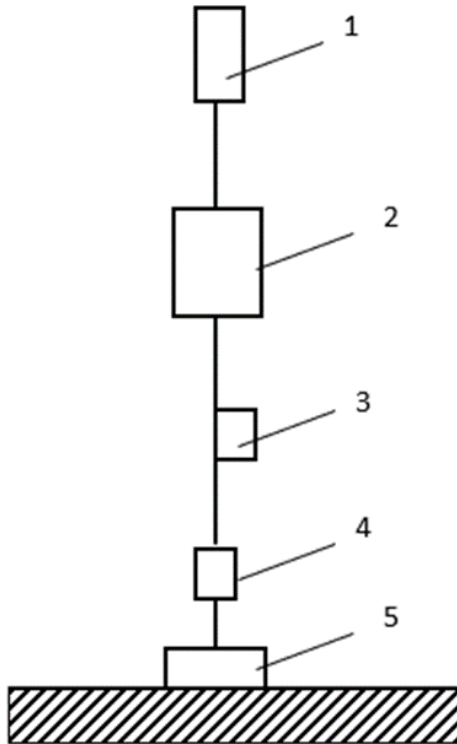


Рис. 2. Гидроакустический маяк - многоразовый ответчик 1 - плавучесть, 2 - блок маяка, 3 - уголкового отражателя, 4 - разъединитель, 5 - якорь

При использовании способа отображения точек на поверхности моря, соответствующих определенным точкам морского дна, на дне устанавливаются узконаправленный гидроакустический излучатель. В фокусе излучателя наблюдается интенсивное «кипение» поверхностного слоя воды. Смещение судна может быть определено по расстоянию до образующегося на поверхности моря пятна. Недостатком метода является высокая мощность, потребляемая подводным излучателем (что, очевидно, ограничивает глубины применения) и сложность построения автоматического измерительного комплекса. Для определения местоположения могут быть использованы методы гидролокации близко расположенных объектов (объекта), координаты которых не изменяются с течением времени (либо всегда известны). Такими ориентирами в открытом море могут быть донные (придонные) заякоренные объекты (гидроакустические маяки), на местоположение которых практически не влияют различные возмущающие факторы (ветер, течение, волнение моря). Гидролокационные системы позволяют определять положение судна практически на любых возможных глубинах. Однако, глубины и радиус действия системы ограничиваются затуханием гидроакустического сигнала и мощностью передатчика. При большой удельной мощности проявляется эффект кавитационного кипения на поверхности излучателя [11], что снижает долю энергии, превращающуюся в полезный сигнал.

В данной статье рассматривается анализ влияния движения судна на точность расчета горизонтальных перемещений.

1. Математическая модель горизонтальных перемещений судна

Известны способы измерения горизонтальных смещений судна – платформы относительно подводного маяка в связанной с платформой системе координат, которые не учитывают качку платформы. Наличие качки может исказить результаты измерений горизонтальных смещений и, таким образом, потребует установки измерителей углов качки [12, 13]. При разработке предлагаемого решения необходимо оценить математическую модель судна.

Преобразование координат подводного маяка (смещений судна) из связанной (качающейся) системы координат в горизонтальную производится в соответствии с выражениями

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= a_1x + b_1y + c_1z \\ y_0 &= a_2x + b_2y + c_2z \\ z_0 &= a_3x + b_3y + c_3z \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где x_0, y_0, z_0 - координаты маяка в горизонтальной системе, т.е. смещения судна, x, y, z - координаты маяка в связанной с судном системе координат, a_i, b_i, c_i ($i=1, 2, 3$) - направляющие косинусы, выражаемые через углы качки по формулам

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \cos\varphi \cos\psi; \quad a_2 = \sin\varphi \cos\psi; \quad a_3 = \sin\psi; \\ b_1 &= \sin\theta \cos\varphi \sin\psi - \cos\theta \sin\varphi; \\ b_2 &= \cos\theta \cos\varphi + \sin\theta \sin\varphi \sin\psi; \quad b_3 = \sin\theta \cos\varphi; \\ c_1 &= \cos\theta \cos\varphi \sin\psi + \sin\theta \sin\varphi; \\ c_2 &= \cos\theta \sin\varphi \sin\psi - \sin\theta \cos\varphi; \quad c_3 = \cos\theta \cos\psi, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где φ, ψ, θ - углы рыскания, дифферента, крена соответственно.

Выразив из третьего уравнения (1) величину z и подставив ее в первое и второе уравнения, получим

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \left(a_1 - \frac{c_1 a_3}{c_3}\right)x + \left(b_1 - \frac{c_1 b_3}{c_3}\right)y + \frac{c_1}{c_3} z_0 \\ y_0 &= \left(a_2 - \frac{c_2 a_3}{c_3}\right)x + \left(b_2 - \frac{c_2 b_3}{c_3}\right)y + \frac{c_2}{c_3} z_0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Так как преобразование осуществляется из связанной системы в горизонтальную систему координат, развернутую на угол φ , то в формуле (3) следует положить $\varphi=0$. При этом формулу (3) через углы качки запишем в виде

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= (\cos\psi + \sin\psi \operatorname{tg}\psi)x + z_0 \operatorname{tg}\psi \\ y_0 &= -x \operatorname{tg}\theta \operatorname{tg}\psi + (\cos\theta + \operatorname{tg}\theta \sin\theta)y - \frac{\operatorname{tg}\theta}{\cos\psi} z_0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

После тригонометрических преобразований формулы (4) примут вид

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{1}{\cos\psi} x + z_0 \operatorname{tg}\psi \\ y_0 &= -x \operatorname{tg}\theta \operatorname{tg}\psi + \frac{1}{\cos\theta} y - \frac{\operatorname{tg}\theta}{\cos\psi} z_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Соотношения (5) определяют горизонтальные смещения судна относительно подводного маяка с учетом качки судна. Для обоснования требований к точности измерительной аппаратуры представляет

интерес исследование влияния погрешности измерения углов качки на точность вычисления горизонтальных смещений судна относительно маяка.

2. Погрешности вычисления горизонтальных смещений судна

Погрешности вычисления горизонтальных смещений судна в зависимости от погрешности измерения углов качки определяется соотношением

$$\Delta A = \frac{\partial A}{\partial \psi} \Delta \psi + \frac{\partial A}{\partial \theta} \Delta \theta, \tag{6}$$

где $A = x_0, y_0$.

Считаем, что погрешность измерения углов качки одинаковы и равны $\Delta \alpha$. При этом на основании формул (5), (6) получим

$$\begin{aligned} \Delta x_0 &= \left(\frac{tg \psi}{\cos^2 \psi} x + \frac{1}{\cos^2 \psi} z_0 \right) \Delta \alpha, \\ \Delta y_0 &= \left[- \left(\frac{tg \psi}{\cos^2 \theta} + \frac{tg \theta}{\cos^2 \psi} \right) x + \frac{tg \theta}{\cos \theta} y - \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{tg \theta tg \psi}{\cos \psi} + \frac{1}{\cos^2 \theta \cos \psi} \right) z_0 \right] \Delta \alpha. \end{aligned} \tag{7}$$

Выражения (7) определяют связь ошибок вычисления горизонтальных смещений судна от значений координат маяка в связанной с судном системе координат, ошибок измерения и величин углов качки.

Для определения зависимостей ошибок измерения горизонтальных смещений судна от положения судна в горизонтальной плоскости воспользуемся обратным преобразованием координат

$$\begin{cases} x = a_1 x_0 + a_2 y_0 + a_3 z_0 \\ y = b_1 x_0 + b_2 y_0 + b_3 z_0 \end{cases}, \tag{8}$$

где $a_i, b_i, i = 1, 2, 3$ - направляющие косинусы, определяемые из формул (2). Теперь выражение (7) с учетом (8) запишем в виде

$$\begin{aligned} \Delta x_0 &= (x_0 tg \psi + z_0) \Delta \alpha, \\ \Delta y_0 &= [y_0 tg \theta - \left(\frac{0.5 \sin 2\psi + tg \theta}{\cos \psi} \right) x_0 - z_0 \cos \psi] \Delta \alpha. \end{aligned} \tag{9}$$

Учитывая, что в рассматриваемом режиме работы для судна допустимые углы качки малы, оценку погрешностей вычисления горизонтальных смещений можно производить по выражениям

$$\begin{aligned} \Delta x_0 &= (x_0 \psi + z_0) \Delta \alpha, \\ \Delta y_0 &= -[(\theta + \psi)x_0 - y_0 \theta + z_0] \Delta \alpha. \end{aligned} \tag{10}$$

Будем определять максимумы модулей ошибок. Для максимума $|\Delta x_0|$ получим

$$\max_{\psi} |\Delta x_0| = |\Delta \alpha| \max_{\psi} |x_0 \psi + z_0|. \tag{11}$$

Так как $z_0 > 0$, то максимум $|\Delta x_0|$ достигается при $x_0 \psi > 0$ и $|\psi| = \max |\psi|$ или при $\psi = \max |\psi| \cdot \text{sign} x_0$.

Тогда можем записать

$$\max_{\psi} |\Delta x_0| = |\Delta \alpha| h_0 + |\Delta \alpha| |x_0| \max \psi. \tag{12}$$

Для максимума $|\Delta y_0|$ получим

$$\max_{\theta, \psi} |\Delta y_0| = |\Delta \alpha| \max_{\theta} \max_{\psi} |(x_0 - y_0)\theta + x_0 \psi + z_0|. \tag{13}$$

Учитывая, что $z_0 > 0$ последнее выражение запишем в виде

$$\max_{\theta} \max_{\psi} |\Delta y_0| = |\Delta \alpha| \left| \max_{\theta} (x_0 - y_0)\theta + \max_{\psi} x_0 \psi + h_0 \right|. \tag{14}$$

Далее получим

$$\max_{\psi} x_0 \psi = |x_0| \max \psi, \tag{15}$$

$$\max_{\theta} (x_0 - y_0)\theta = |x_0 - y_0| \max \theta. \tag{16}$$

Тогда будем иметь

$$\max_{\theta} \max_{\psi} |\Delta y_0| = |\Delta \alpha| (|x_0 - y_0| \max \theta + |x_0| \max \psi + h_0). \tag{17}$$

Следовательно, $\max |\Delta y_0|$ достигается при максимальных абсолютных значениях углов θ и ψ .

Графики зависимостей погрешностей измерения горизонтальных смещений судна для максимальных абсолютных значений углов от параметров x_0, y_0 приведены на рис. 3, 4.

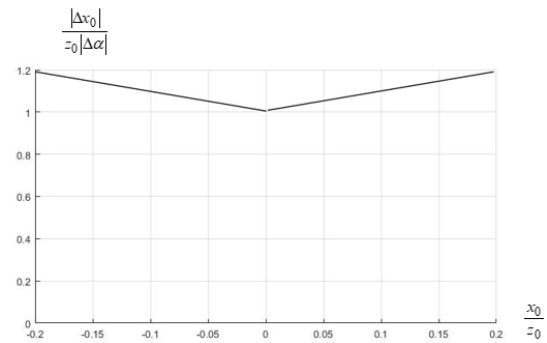


Рис. 3. График погрешности измерения координаты

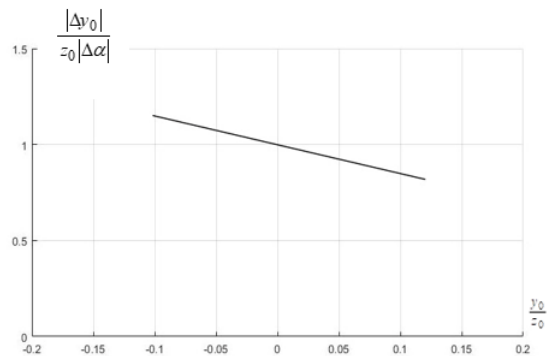


Рис. 4. График погрешности измерения координаты

Получаем, что максимальные по модулю погрешности вычисления горизонтальных смещений судна имеют место при максимальных по модулю значениях переменных x_0, y_0, θ, ψ и пропорциональны модулю погрешности измерения углов качки. Для глубин более 100м ($z_0 > 100$) максимальными значениями модулей произведений переменных можно пренебречь и погрешности вычисления горизонтальных смещений определять по приближенному выражению

$$\Delta x_0 = \Delta y_0 = z_0 \Delta \alpha. \tag{18}$$

Углы качки судна можно исключить из расчетных формул для горизонтальных смещений путем использования двух систем измерения смещений в

связанной с судном системе координат по отношению к двум разнесенным по глубине подводным маякам.

Пусть одновременно измерены в связанной системе координат координаты двух подводных маяков x', y', x'', y'' и глубины их погружения z'_0, z''_0 . Тогда в соответствии с формулой (5) запишем систему уравнений для определения горизонтальных смещений и углов качки судна

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{1}{\cos\psi} x' + z'_0 \operatorname{tg}\psi \\ y_0 &= -x' \operatorname{tg}\theta \operatorname{tg}\psi + \frac{1}{\cos\theta} y' - \frac{\operatorname{tg}\theta}{\cos\psi} z'_0 \\ x'_0 &= \frac{1}{\cos\psi} x'' + z''_0 \operatorname{tg}\psi \\ y'_0 &= -x'' \operatorname{tg}\theta \operatorname{tg}\psi + \frac{1}{\cos\theta} y'' - \frac{\operatorname{tg}\theta}{\cos\psi} z''_0 \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

Учитывая, как и ранее, что допустимые углы качки малы, систему уравнений (19) можно упростить и записать в виде

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= x' + z'_0 \psi \\ y_0 &= -x' \theta \psi + y' - \theta z'_0 \\ x'_0 &= x'' + z''_0 \psi \\ y'_0 &= -x'' \theta \psi + y'' - \theta z''_0 \end{aligned} \right\}. \quad (20)$$

Из системы уравнений (20) можно исключить углы качки судна и для горизонтальных смещений, пренебрегая членами, содержащими произведения углов качки, записать соотношения

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= (x'' z'_0 - x' z''_0) / (z'_0 - z''_0), \\ y_0 &= (y'' z'_0 - y' z''_0) / (z'_0 - z''_0). \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Соотношения (15) инвариантны к качке судна. Погрешности вычисления горизонтальных смещений бурового судна по формулам (21) равны погрешностям измерения координат в связанной с судном системе.

3. Влияние гидроакустических параметров на выбор сигнала буй - ориентира

Специфика распространения и условий приема гидроакустического сигнала – зависимость коэффициента поглощения от частоты сигнала, возможное отражение сигнала от дна и других препятствий, приводящее к многолучевости, характеристики шумов моря – все это определяет выбор параметров сигнала гидроакустического ориентира разностно – дальномерной системы определения положения.

Типичная компоновка гидроакустического маяка – ответчика приведена на рис.2. При такой установке маяка возможен прием отраженного от дна сигнала через время большее, чем

$$t_{otr} = \frac{2h}{c}, \quad (22)$$

где h - высота установки гидроакустического маяка над поверхностью дна.

В свою очередь, высота установки не может быть взята слишком большой, вследствие сноса маяка течением и появления погрешностей из-за отклонения маячной системы от вертикали.

Аналогичное влияние оказывает и отражение сигнала от поверхности воды. Вклады многократных

отражений сигнала и отражений от неровностей рельефа, которые также могут привести к появлению ложных ориентиров при установке источника на высоте не менее 15...20м над уровнем дна и периоде между сигналами не менее $10...20 \times t_{otr}$ в сигнал помехи становятся достаточно малыми [14].

Весьма важную роль играет частотная зависимость затухания звука в гидроакустическом канале. Высокочастотные составляющие спектра затухают значительно быстрее низкочастотных. Гидроакустический канал служит фильтром высоких частот, обуславливая завал фронтов излучаемого импульса. С другой стороны, понижение излучаемой гидроакустическим приемником частоты сигнала также не может быть рациональным вследствие убывающего характера интенсивности шумов моря, приведенных ко входу приемника.

Для станций гидроакустической связи известна формула, определяющая оптимальную частоту излучения

$$f_{opt} = \frac{62000}{r^{2/3}}, \quad (23)$$

где r - расстояние между передатчиком и приемником системы.

Ограничение длительности излучаемого сигнала (22) и оптимальной частоты излучаемого сигнала (23) приводят к необходимости использования в качестве излучаемых гидроакустическим маяком – ориентиром разностно – дальномерной системы определения положения радиоимпульсов.

Потери акустической энергии в среде описываются законом [14]

$$\alpha r = 10 \lg I_2 - 10 \lg I_1, \quad (24)$$

где α - логарифмический коэффициент затухания, I_1, I_2 - интенсивность сигнала у источника и приемника соответственно, r - расстояние между источником и приемником.

Коэффициент затухания в свою очередь зависит от частоты

$$\alpha = \frac{0.11}{1 + f^2} + \frac{44 f^2}{4100 + f^2} + 3 \cdot 10^{-4} f^2, \quad (25)$$

где f - частота (кГц).

Характеристики, приведенные на рис.5. являются основанием для выбора необходимой мощности излучения гидроакустического маяка в зависимости от глубины моря в точке проведения работ.

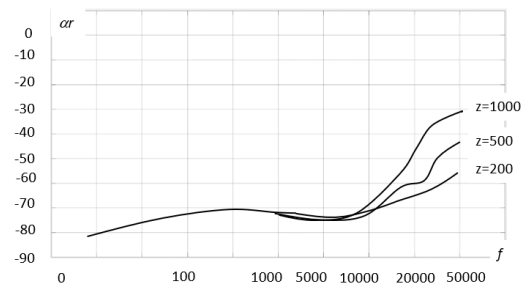


Рис.5. Несущая частота сигнала гидроакустического маяка

Заключение

Система удержания судна над заданной точкой является многосвязной, многоканальной системой, подверженной случайным внешним воздействиям. Получена упрощенная математическая модель горизонтальных перемещений судна – платформы.

Анализ погрешностей вычисления горизонтальных смещений судна в условиях качки (соотношения (11) - (17)) показывают, что качка судна влияет на точность вычисления горизонтальных смещений. Эти соотношения могут использоваться

для обеспечения требований к точности измерительной аппаратуры углов качки на различных глубинах. Они дают возможность сравнить системы измерения горизонтальных смещений судна с измерителями углов качки и без них. Из приведенных соотношений видно, что максимальные ошибки имеют место при максимальных углах бортовой и килевой качки. Это определяет необходимость измерения углов качки судна. Требования к точности измерения этих углов определяются допустимыми отклонениями бурового судна в горизонтальной плоскости.

Литература

1. Saeed A., Fatima M., Ansa S. and Mairaj F. Design and analysis of unarmed underwater vehicle// The 2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Ankara, Turkey.
2. Molland A. F. Underwater vehicles// Marit. Eng. Ref. B, 2008.-p. 728-783.
3. Gafurov S. A., E. V. Klochkov Autonomous Unmanned Underwater Vehicles Development Tendencies// Procedia Engineering,- 2015.-vol. 106.- p. 141-148,.
4. Patil D., Ansari M., Tendulkar D., Bhatlekar R., Pawar V. N. A Survey On Autonomous Military Service Robot// The 2020 International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ic-ETITE), Vellore, India.
5. Kabanov A., Kramar V., Lipko I. Motion Control of Catamaran-type Floating Station for Gripping the AUV// The 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon.- Vladivostok Russia.
6. Abrougui H., Nejim S., Dallagi H. Modeling and Autopilot Design for an Autonomous Catamaran Sailboat Based on Feedback Linearization// The 2019 International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies, Hammamet, Tunisia.
7. Liu Y. Design and Mechanical Analysis of a Deepwater Sample Collection for Double-Body Unmanned Surface Vehicle// The 2018 3rd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE), Guangzhou,.
8. Setyawan D., Utama I K., Murdijanto A. P., Sugiarto A., Jamaluddin A. Development of Catamaran Fishing Vessel// The Journal for Technology and Science.- 2010.-Vol. 21, No. 4.-p.37-49.
9. Jamaluddin A., Utama I K., Molland A.F.Experimental investigation into the drag characteristics of symmetrical and asymmetrical staggered and unstaggered catamarans// The 2010 International Series Conference, Surabaya, Indonesia.
10. Lipko I. Forecasting of catamaran roll threshold exceeding// The 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon Sochi, Russia.
11. Тарасюк Ю.Ф. Серавин Г.Н. Гидроакустическая телеметрия. - «Судостроение», 1973
12. Faltinsen, O.M. Hydrodynamics of high-speed marine vehicles Cambridge University press, 2006, p.454.
13. Rekdalsbakken, W. Design and application of a motion platform for a high-speed craft simulator// The 2006 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM, Budapest, Hungary.
14. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. - Ленинград: Судостроение, 1978.

References

1. Saeed A., Fatima M., Ansa S. and Mairaj F. Design and analysis of unarmed underwater vehicle// The 2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Ankara, Turkey.
2. Molland A. F. Underwater vehicles// Marit. Eng. Ref. B, 2008.-p. 728-783.
3. Gafurov S. A., E. V. Klochkov Autonomous Unmanned Underwater Vehicles Development Tendencies// Procedia Engineering,- 2015.-vol. 106.- p. 141-148,.
4. Patil D., Ansari M., Tendulkar D., Bhatlekar R., Pawar V. N. A Survey On Autonomous Military Service Robot// The 2020 International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ic-ETITE), Vellore, India.
5. Kabanov A., Kramar V., Lipko I. Motion Control of Catamaran-type Floating Station for Gripping the AUV// The 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon.- Vladivostok Russia.
6. Abrougui H., Nejim S., Dallagi H. Modeling and Autopilot Design for an Autonomous Catamaran Sailboat Based on Feedback Linearization// The 2019 International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies, Hammamet, Tunisia.
7. Liu Y. Design and Mechanical Analysis of a Deepwater Sample Collection for Double-Body Unmanned Surface Vehicle// The 2018 3rd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE), Guangzhou,.
8. Setyawan D., Utama I K., Murdijanto A. P., Sugiarto A., Jamaluddin A. Development of Catamaran Fishing Vessel// The Journal for Technology and Science.- 2010.-Vol. 21, No. 4.-p.37-49.
9. Jamaluddin A., Utama I K., Molland A.F.Experimental investigation into the drag characteristics of symmetrical and asymmetrical staggered and unstaggered catamarans// The 2010 International Series Conference, Surabaya, Indonesia.
10. Lipko I. Forecasting of catamaran roll threshold exceeding// The 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon Sochi, Russia.

11. Tarasyuk Yu.F. Seravin G.N. Gidroakusticheskaya telemetriya [Hydroacoustic telemetry]. - «Sudostroenie», 1973.
12. Faltinsen, O.M. Hydrodynamics of high-speed marine vehicles Cambridge University press, 2006, p.454.
13. Rekdalsbakken, W. Design and application of a motion platform for a high-speed craft simulator// The 2006 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM, Budapest, Hungary.
14. Urik R. Dzh. Osnovy gidroakustiki [Principles of underwater sound]. Leningrad: Sudostroenie, 1978.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Александрович Кабанов, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Информатика и управление в технических системах», Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: kabanovaleksey@gmail.com

Вадим Александрович Крамарь, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информатика и управление в технических системах», Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: kramarv@mail.ru

Алексей Валерьевич Титов, кандидат технических наук, проректор по цифровизации, инновациям и приоритетным проектам, Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева (АГУ им. В.Н.Татищева), 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, titov@asu.edu.ru

Aleksey A. Kabanov, Ph.D. (Eng.), assistant professor, head of the Department of Informatics and control in technical systems, Sevastopol State University, Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: kabanovaleksey@gmail.com

Vadim A. Kramar, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Informatics and Control in Technical Systems, Sevastopol State University, Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: kramarv@mail.ru

Alexey V. Titov, Ph.D. (Eng), Vice-Rector for Digitalization, Innovations and Priority Projects, Astrakhan State University name of V.N. Tatishcheva, , Tatishcheva St., 20a, Astrakhan, 414056, Russian Federation, titov@asu.edu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.11.2022

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.02.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 15.02.2023.

Научная статья

УДК 534.512.1

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.035>

К вопросу о моделировании стоячих волн с учетом стратификации в Балтийском море

А.И. Руденко¹ aleksej.rudenko@klgtu.ru¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Волновые процессы на поверхности океанических акваторий играют одну из главных ролей в формировании климата окружающей среды, рельефа морского дна и береговой зоны. Волны влияют на распределение энергетических потоков внутри водного континуума, который может быть стратифицирован по плотности, солёности, температуре. Учет всех указанных характеристик одновременно весьма сложный, поэтому в данной работе учтена стратификация по плотности. Необходимо отметить, что в некоторых районах Балтийского моря можно выделить три слоя жидкости с различными плотностями. В статье рассмотрена задача о двумерных стационарных поверхностных и внутренних волнах в стратифицированной по плотности жидкости конечной глубины при условии, что волновые движения являются потенциальными. В рамках классической двумерной модели выделены три слоя стратифицированной жидкости. Найдены частоты колебаний установившихся волн в каждом стратифицированном слое. Определены кинетические энергии для каждого стратифицированного слоя. Обоснована генерация энергии при передачи направленного потока от слоя к слою жидкости.

Ключевые слова: стационарная волна, потенциал скорости, профиль поверхности, частота колебаний, профиль поверхности, кинематическое условие, динамическое условие.

Для цитирования: Руденко А.И. К вопросу о моделировании стоячих волн с учетом стратификации в Балтийском море, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 268—272. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.035

Original articleDOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.035>

On Modelling of Standing Waves Considering the Stratification in the Baltic Sea

Alexey I. Rudenko¹ aleksej.rudenko@klgtu.ru¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. Wave processes on the surface of oceanic waters play a major role in shaping the environmental climate, the relief of the seabed and the coastal zone. Waves affect the distribution of energy flows within the water continuum, which can be stratified by density, salinity, temperature. Taking into account all these characteristics at the same time is a very complex problem, therefore, stratification by density is taken into account in this work. It should be noted that in some areas of the Baltic Sea, three layers of liquid with different densities can be distinguished. The paper considers the problem of two-dimensional standing surface and internal waves in a density-stratified fluid of finite depth under the condition that the wave motions are potential. Within the framework of the classical two-dimensional model three layers of stratified fluid are identified. Oscillation frequencies of the standing waves are found in each stratified layer. Kinetic energy is estimated for each stratified layer. Energy generation during the transfer of the energy flow from one layer of the fluid to another has been substantiated.

Keywords: standing wave, velocity potential, surface profile, oscillation frequency, kinematic condition, dynamic condition.

For citing: Rudenko Alexey I., On Modelling of Standing Waves Considering the Stratification in the Baltic Sea, Marine Intellectual Technologies, 2023. № 1 part 1, P. 268—272. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.035

Введение

Стационарные волны в Балтийском море формируются каждый год. За годичный интервал одноузловые стационарные волны составляют от трех до девяти дней, а стационарные волны с несколькими узлами от семи до двенадцати дней. К редким стационарным волнам в Балтийском море следует отнести волны с тремя и четырьмя узлами, для которых амплитуда находится в диапазоне от 30 до 50 сантиметров. Необходимо отметить, что стационарные волны, которые характеризуются одним узлом, больше всего повторяются в акватории Балтийского моря и они имеют период от суток до 28 часов. Когда циклоны движутся один за другим, то

одноузловые волны в течение времени наблюдения могут складываться между собой, что влечет за собой, соответственно, увеличение результирующей амплитуды. Необходимо отметить, что увеличение амплитуды суперпозиционной стоячей волны может привести к ряду неблагоприятных последствий [1].

Модель трехслойной стратифицированной жидкости. Кинематические характеристики

Рассмотрим стоячие волны на поверхности стратифицированной по плотности неоднородной жидкости [5,9]. Введем некоторые обозначения и пояснения: $H \rightarrow \infty$ - жидкость бесконечной глубины с плотностью ρ_3 ; h_2 , ρ_2 - слой жидкости, который

лежит над слоем H ; h_1 , ρ_1 - верхний слой жидкости, который лежит, соответственно, над слоем h_2 ; $\rho_1 \leq \rho_2 \leq \rho_3$ - условия стратификации жидкости. Пусть φ_i, η_i - потенциал скорости, профиль волны ($i=1$ - на свободной поверхности, $i=2,3$ - на границах стратификации).

При решении использована двумерная модель (O, x, y) , где ось Ox совмещена с поверхностью раздела слоев ρ_2, ρ_3 , а ось Oy направлена вертикально вверх. Запишем гидродинамические уравнения для верхнего слоя жидкости:

$$\eta_1 = \frac{1}{g} \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} \right)_{y=h_1+h_2},$$

$$\left(\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} \right)_{y=h_1+h_2} = 0. \quad (1)$$

Интегралы Бернулли в упрощенной форме будут иметь следующий вид:

$$\frac{p_1}{\rho_1} = \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} - gy, \quad \frac{p_2}{\rho_2} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} - gy, \quad \frac{p_3}{\rho_3} = \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} - gy,$$

где p_i - давление в соответствующем слое жидкости. Рассматривая попарно уравнения для формул интеграла Бернулли, получим первое условие сопряжения слоев жидкости:

$$\rho_1 \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} - g\eta_2 \right) = \rho_2 \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial t} - g\eta_2 \right),$$

$$\rho_2 \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial t} - g\eta_3 \right) = \rho_3 \left(\frac{\partial \varphi_3}{\partial t} - g\eta_3 \right).$$

Последние уравнения относительно η_2, η_3 будут иметь вид:

$$\eta_2 = \frac{1}{g(\rho_2 - \rho_1)} \left(\rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} - \rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} \right)_{y=h_2},$$

$$\eta_3 = \frac{1}{g(\rho_3 - \rho_2)} \left(\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} - \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} \right)_{y=0}. \quad (2)$$

Необходимо отметить, что относительно поверхности раздела (границы стратификации) движутся одни и те же частицы верхней жидкости и одни и те же частицы нижней жидкости.

Для линий раздела стратификации в жидкости запишем дополнительные кинематические условия:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial y} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} \Big|_{y=h_2}, \quad \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} = \frac{\partial \varphi_3}{\partial y} \Big|_{y=0}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta_2}{\partial t} = - \frac{\partial \varphi_2}{\partial y}, \quad \frac{\partial \eta_3}{\partial t} = - \frac{\partial \varphi_3}{\partial y}. \quad (4)$$

Исключая η_2, η_3 из (2), (4), получаем:

$$\rho_2 \left(\frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} \right) - \rho_1 \left(\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} \right) = 0,$$

$$\rho_3 \left(\frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_3}{\partial y} \right) - \rho_2 \left(\frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} \right) = 0. \quad (5)$$

Гармонические функции для потенциалов скоростей $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ должны автоматически удовлетворять уравнениям (1), (3), (5). В случае $H = const$, то необходимо добавить условие:

$$\left(\frac{\partial \varphi_3}{\partial y} \right)_{y=-H} = 0.$$

Решение поставленной задачи будем искать в виде:

$$\varphi_1 = (A_1 e^{ky} + B_1 e^{-ky}) \cos kx \cos \sigma t,$$

$$\varphi_2 = (A_2 e^{ky} + B_2 e^{-ky}) \cos kx \cos \sigma t, \quad (6)$$

$$\varphi_3 = A_3 e^{ky} \cos kx \cos \sigma t, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda},$$

k, σ - волновое число, частота колебаний. Для определения коэффициентов A_1, A_2, A_3, B_1, B_2 в (6) воспользуемся уравнениями (1), (3), (5). Таким образом, получим следующую систему уравнений:

$$(\sigma^2 - kg)e^{k(h_1+h_2)} A_1 + (\sigma^2 + kg)e^{-k(h_1+h_2)} B_1 = 0,$$

$$\rho_2((\sigma^2 - kg)e^{kh_2} A_2 + (\sigma^2 + kg)e^{-kh_2} B_2) -$$

$$\rho_1((\sigma^2 - kg)e^{kh_2} A_1 + (\sigma^2 + kg)e^{-kh_2} B_1) = 0, \quad (7)$$

$$e^{kh_2} A_1 - e^{-kh_2} B_1 = e^{kh_2} A_2 - e^{-kh_2} B_2,$$

$$\rho_3(\sigma^2 - kg)A_3 - \rho_2((\sigma^2 - kg)A_2 + (\sigma^2 + kg)B_2) = 0,$$

$$A_2 - B_2 = A_3.$$

Определитель системы (7) имеет вид:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 0 & -\rho_2(\sigma^2 - kg) & \rho_3(\sigma^2 - kg) \\ e^{kh_2} & -e^{kh_2} & 0 \\ -\rho_1(\sigma^2 - kg)e^{kh_2} & \rho_2(\sigma^2 - kg)e^{kh_2} & 0 \\ (\sigma^2 - kg)e^{k(h_1+h_2)} & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 0 & -1 \\ 0 & -\rho_2(\sigma^2 + kg) \\ -e^{-kh_2} & e^{-kh_2} \\ -\rho_1(\sigma^2 - kg)e^{-kh_2} & \rho_2(\sigma^2 + kg)e^{-kh_2} \\ (\sigma^2 + kg)e^{-k(h_1+h_2)} & 0 \end{vmatrix}.$$

Приравняем определитель к нулю, получим:

$$\alpha \sigma^4 + 2kg\beta \sigma^2 + k^2 g^2 \gamma = 0, \quad \alpha < 0, \quad \gamma < 0, \quad \beta > 0.$$

Корни данного уравнения с учетом их физического смысла имеют следующий вид:

$$\sigma_1^2 = kg, \quad (8.1)$$

$$\sigma_2^2 = \frac{kg}{\alpha} (-\beta - \sqrt{\beta^2 - \alpha\gamma}), \quad (8.2)$$

$$\sigma_3^2 = \frac{kg}{\alpha} (-\beta + \sqrt{\beta^2 - \alpha\gamma}), \quad (8.3)$$

где постоянные коэффициенты определены через плотности в соответствующих слоях и глубины следующими соотношениями:

$$\alpha = -(\rho_2 \rho_3 + \rho_1 \rho_3 + \rho_1 \rho_2 + \rho_2^2) e^{k(h_1+h_2)} +$$

$$(\rho_1^2 - \rho_1 \rho_3 + \rho_1 \rho_3 + \rho_1 \rho_2 - \rho_2 \rho_3) e^{-k(h_1+h_2)} +$$

$$(-\rho_1^2 + \rho_1 \rho_3 - \rho_2 \rho_3 + \rho_1 \rho_2 - \rho_2^2) e^{k(h_2-h_1)} +$$

$$(\rho_1 \rho_3 - \rho_1 \rho_2 - \rho_2 \rho_3) e^{-k(h_2-h_1)},$$

$$\begin{aligned} \beta &= (\rho_1 \rho_3 + \rho_2 \rho_3) e^{k(h_1+h_2)} + \\ & (\rho_1 \rho_2 - \rho_2 \rho_3) e^{-k(h_1+h_2)} + \\ & (\rho_1^2 + \rho_1 \rho_2 - \rho_2^2) e^{k(h_2-h_1)} - \\ & \rho_1 \rho_3 e^{-k(h_2-h_1)}, \\ \gamma &= (-\rho_2 \rho_3 - \rho_1 \rho_3 + \rho_1 \rho_2 + \rho_2^2) e^{k(h_1+h_2)} + \\ & (-\rho_1^2 + \rho_1 \rho_3 + \rho_1 \rho_2 - \rho_2 \rho_3) e^{-k(h_1+h_2)} + \\ & (-\rho_1^2 - \rho_1 \rho_3 + \rho_2 \rho_3 + \rho_1 \rho_2 - \rho_2^2) e^{k(h_2-h_1)} + \\ & (\rho_1 \rho_3 - \rho_1 \rho_2 + \rho_2 \rho_3) e^{-k(h_2-h_1)}. \end{aligned}$$

Подставляя первое значение частоты, (8.1), в систему уравнений (7), получаем, что константы соответственно равны $A_1 = A_2 = A_3, B_1 = B_2 = 0$.

Таким образом система уравнений (6) примет вид:

$$\begin{aligned} \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 &= A_1 e^{ky} \cos kx \cos \sigma t, \\ k &= \frac{2\pi}{\lambda}. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, подставляя (9) в (2), можно показать, что профиль свободной поверхности в трехслойной стратифицированной по плотности жидкости может быть определен:

$$\eta_1 = -\frac{\sigma_1}{g} (A_1 e^{ky} \cos kx \sin \sigma_1 t)_{y=h_1+h_2}. \quad (10)$$

В свою очередь, профили первой и второй внутренних волн на границах раздела стратификации могут определены:

$$\eta_2 = -\frac{\sigma_1}{g} (A_1 e^{ky} \cos kx \sin \sigma_1 t)_{y=h_2},$$

$$\eta_3 = -\frac{\sigma_1}{g} (A_1 e^{ky} \cos kx \sin \sigma_1 t)_{y=0}.$$

Отметим, что модуль амплитуды стоячих внутренних волн при приближении к нулевому потенциальному уровню экспоненциально уменьшается [6,8].

Далее рассмотрим частоты σ_2, σ_3 , (8.2)-(8.3), которые будут определять профили для внутренних волн в первой и второй внутренних волн профили трехслойной стратифицированной жидкости. Для свободных поверхностей имеют вид:

$$\eta_2 = \frac{\cos kx}{g(\rho_2 - \rho_1)} (\rho_1 \sigma_1 (A_1 e^{ky} + B_1 e^{-ky}) \sin \sigma_1 t -$$

$$\rho_2 \sigma_2 (A_2 e^{ky} + B_2 e^{-ky}) \sin \sigma_2 t)_{y=h_2}, \quad (11)$$

$$\eta_3 = \frac{\cos kx}{g(\rho_3 - \rho_2)} (\rho_2 \sigma_2 (A_2 e^{ky} + B_2 e^{-ky}) \sin \sigma_2 t -$$

$$\rho_3 \sigma_3 (A_3 e^{ky} \sin \sigma_3 t)_{y=0}. \quad (12)$$

Из анализа формул (10), (11) тот факт, что в случае, если длина волны остается фиксированной, то небольшой перепад в плотности влечет за собой уменьшение частот второго рода, σ_2, σ_3 , а, следовательно, это приведет к увеличению периода волны. Тогда скорость генерации внутренних волн будет меньше скорости поверхностных волн.

Модель трехслойной стратифицированной жидкости. Энергия волн

Волновые движения зададим следующей системой уравнений, составляющих суммарной скорости:

$$\begin{aligned} u &= -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \\ v &= -\frac{\partial \varphi}{\partial y}. \end{aligned} \quad (13)$$

Тогда с учетом формул (6), (13) суммарный квадрат скорости на свободной поверхности может быть определен:

$$\begin{aligned} V_I^2 &= k^2 \cos^2 \sigma_1 t (A_1^2 e^{k(h_1+h_2)} + B_1^2 e^{-k(h_1+h_2)} - \\ & - 2A_1 B_1 \cos 2kx), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{II}^2 &= k^2 \cos^2 \sigma_2 t (A_2^2 e^{kh_2} + B_2^2 e^{-kh_2} - \\ & - 2A_2 B_2 \cos 2kx), \end{aligned}$$

$$V_{III}^2 = k^2 A_3^2 \cos^2 \sigma_3 t. \quad (14)$$

Кинетическая энергия жидкости некоторой постоянной массы жидкости может быть определена следующим образом:

$$W = \frac{\rho_i}{2} \int_{-\frac{\pi}{k}}^{\frac{\pi}{k}} V_i^2 dx \int_0^{\eta} \left[\frac{e^{2k(y+h)} + e^{-2k(y+h)}}{2} - \cos 2kx \right] dy, \quad (15)$$

где $i = I, II, III$.

Таким образом, формулу (15) преобразуем с учетом формул (10)-(14), получим аналитические выражения для кинетических энергий на соответствующих линиях раздела в стратифицированной жидкости и на свободной поверхности.

Кинетическая энергия на свободной поверхности может быть определена:

$$W_I = \frac{\rho_1}{2} \int_{-\frac{\pi}{k}}^{\frac{\pi}{k}} V_I^2 dx \int_0^{\eta_1} \left[\frac{e^{2k(y+h_1+h_2)} + e^{-2k(y+h_1+h_2)}}{2} - \cos 2kx \right] dy.$$

Кинетические энергии на границах стратификации соответственно равны:

$$W_{II} = \frac{\rho_2}{2} \int_{-\frac{\pi}{k}}^{\frac{\pi}{k}} V_{II}^2 dx \int_0^{\eta_2} \left[\frac{e^{2k(y+h_2)} + e^{-2k(y+h_2)}}{2} - \cos 2kx \right] dy,$$

$$W_{III} = \frac{\rho_3}{2} \int_{-\frac{\pi}{k}}^{\frac{\pi}{k}} V_{III}^2 dx \int_0^{\eta_3} \left[\frac{e^{2ky} + e^{-2ky}}{2} - \cos 2kx \right] dy.$$

В результате интегрирования, получаем:

$$W_I = \frac{\pi \rho_1 \cos^2 \sigma_1 t}{k^2} (A_1^2 e^{(h_1+h_2)} + B_1^2 e^{-(h_1+h_2)}) \times$$

$$(sh 2k(\eta_1 + h_1 + h_2) - sh 2k(h_1 + h_2)),$$

$$W_{II} = \frac{\pi \rho_2 \cos^2 \sigma_2 t}{k^2} (A_2^2 e^{h_2} + B_2^2 e^{-h_2}) \times$$

$$(sh 2k(\eta_2 + h_2) - sh 2kh_2),$$

$$W_{III} = \frac{\pi \rho_3 \cos^2 \sigma_3 t}{k^2} (A_2^2 e^{h_2} + B_1^2 e^{-h_2}) sh 2k\eta_3.$$

Необходимо отметить, что последние формулы хорошо согласуются с натурными наблюдениями [4].

Заключение

Необходимо отметить, анализируя последние три формулы, что энергия волн уменьшается, так, например, при $h = \lambda$ амплитуда уменьшается примерно в 530 раз. Натурные наблюдения показывают, что в акватории Балтийского моря стационарные волны не превосходят 8—10 метров,

а волны, достигающие амплитуду 15 метров, встречаются весьма редко [2,3,7,10]. Случай $h = \lambda$, мелководье, опасен тем, что в результате трения волны о дно происходит опрокидывание гребня (прибой). Прибой опасен тем, что он может изменять рельеф дна и наносить урон прибрежным сооружениям и конструкциям.

Инженерные расчеты показывают, что устойчивость судна зависит от его геометрических размеров. Период масштабных волн не превышает 10—15 секунд, поэтому корабли, имеющие период собственных колебаний примерно 20 секунд будут подвержены малой качки.

Литература

1. Rabinovich A.B. Seiches and harbor oscillations. – Handbook of Coastal and Ocean Engineering / Kim. Y.C. (ed.). Chapter 9. World Scientific Publ., Singapore, 2009. P. 193–236.
2. Aitsam A., Elken J. Synoptic scale variability of hydrophysical fields in the Baltic Propervon the basis of CTD measurements // Hydrodynamics of semi-enclosed seas. Amsterdam, 1982. P. 433–468.
3. Raudsepp U., Beletsky D., Schwab D. Basin-scale topographic Waves in the gulf of Riga // J. Phys. Oceanogr. 2003. 33. P. 1129–1140.
4. Куликов Е.А., Медведев И.П. Изменчивость уровня Балтийского моря и наводнения в Финском заливе // Океанология. 2013. Т. 53. № 2. С. 167–174.
5. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. М. Наука, 1977. - 816 с.
6. Фукс В.Р. Градиентно-вихревые волны в Балтийском море. // Метеорология и гидрология. 2005. № 9. С. 63–68
7. Фукс В.Р. Планетарные волны в океане. Спб.: СПбГУ, 1977. 176 с.
8. Захарчук Е.А., Тихонова Н.А. Собственные низкочастотные колебания Балтийского моря. // Труды ГОИН. 2007. № 210. С. 96–107.
9. Гусев А.К., Захарчук Е.А., Иванов Н.Е., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А., Тихонова Н.А., Фукс В.Р. Динамика вод Балтийского моря в синоптическом диапазоне пространственно-временных масштабов. Спб.: Гидрометеоздат, 2007. 354 с.
10. Raudsepp U., Beletsky D., Schwab D. Basin-scale topographic Waves in the gulf of Riga // J. Phys. Oceanogr. 2003. 33. P. 1129–1140.

References

1. Rabinovich A.B. Seiches and harbor oscillations. – Handbook of Coastal and Ocean Engineering / Kim. Y.C. (ed.). Chapter 9. World Scientific Publ., Singapore, 2009. P. 193–236.
2. Aitsam A., Elken J. Synoptic scale variability of hydrophysical fields in the Baltic Propervon the basis of CTD measurements // Hydrodynamics of semi-enclosed seas. Amsterdam, 1982. P. 433–468.
3. Raudsepp U., Beletsky D., Schwab D. Basin-scale topographic Waves in the gulf of Riga // J. Phys. Oceanogr. 2003. 33. P. 1129–1140.
4. Kulikov E.A., Medvedev I.P. Variability of the Baltic Sea level and floods in the Gulf of Finland // Oceanology. 2013. V. 53. No. 2. P. 167–174.
5. Sretensky L.N. Theory of wave motions of a liquid. M. Nauka, 1977. - 816 p.
6. Fuchs V.R. Gradient-vortex waves in the Baltic Sea. // Meteorology and Hydrology. 2005. № 9. С. 63–68.
7. Fuchs V.R. Planetary waves in the ocean. St. Petersburg: St. Petersburg State University, 1977. 176 p.
8. Zakharchuk E.A., Tikhonova N.A. Proper low-frequency oscillations of the Baltic Sea. // Proceedings of GOIN. 2007. No. 210. P. 96–107.
9. Gusev A.K., Zakharchuk E.A., Ivanov N.E., Klevantsov Yu.P., Rozhkov V.A., Tikhonova N.A., Fuchs V.R. Dynamics of the Baltic Sea waters in the synoptic range of space-time scales. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 2007. 354 p.
10. Raudsepp U., Beletsky D., Schwab D. Basin-scale topographic Waves in the gulf of Riga // J. Phys. Oceanogr. 2003. 33. P. 1129–1140.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Иванович Руденко, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и информационных технологий Калининградского государственного технического университета, 236022, Калининград, Советский пр.1., e-mail: aleksej.rudenko@klgtu.ru.

Alexey I. Rudenko, Ph.D.(Phys & Math), Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Information Technology of the Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy Ave.,1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: aleksej.rudenko@klgtu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.02.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.02.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 27.02.2023.

Научная статья

УДК 551.510.535

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.036>

Схема построения вычислительного эксперимента расчета климатических и ионосферных параметров Земли

А.Д. Колин¹ yojik14@gmail.com, В.В. Медведев¹ vmedvedev2012@mail.ru

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. В данной работе представлена математическая модель расчета высотно-временных параметров нейтрального и ионного состава, скоростей, температуры, описываемая системой дифференциальных уравнений с не самосопряженным дифференциальным оператором. Таким образом целью данной работы является правильное написание системы дифференциальных уравнений, описывающих мезосферу, термосферу и ионосферу, а также метод их решения и проверку правильности полученных результатов, что и составляет валидация, верификация, идентификация. В результате проведенных исследований, для этих уравнений, путем свертки написана однородная, консервативная, разностная схема, численно устойчивая удовлетворяющая принципу максимума, построенная на основе интегро-интерполяционного метода, которая решается методом прогонки. Была написана блок-схема численного решения этих уравнений, которая существенно облегчает понимание всей структуры такой модели и позволяет проводить вычислительный эксперимент для любого пользователя.

Ключевые слова: ионосфера, вычисления, уравнения, математическая модель, температура, концентрация, электроны, ионы, валидация, верификация, идентификация.

Для цитирования: Колин А.Д., Медведев В.В. Схема построения вычислительного эксперимента расчета климатических и ионосферных параметров Земли, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 273—277. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.036

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.036>

Scheme of building a computational experiment for calculating climatic and ionospheric parameters of the Earth

Anton D. Kolin¹ yojik14@gmail.com, Vladimir V. Medvedev¹ vmedvedev2012@mail.ru

¹Kaliningrad State Technical University

Annotation. This paper presents a mathematical model for calculating the height-time parameters of the neutral and ionic composition, velocities, temperature, described by a system of differential equations with a non-self-adjoint differential operator. Thus, the purpose of this work is the correct writing of a system of differential equations describing the mesosphere, thermosphere and ionosphere, as well as a method for solving them and checking the correctness of the results obtained, which is validation, verification, identification.

As a result of the research, for these equations, by convolution, a homogeneous, conservative, difference scheme was written, numerically stable satisfying the maximum principle, built on the basis of the integro-interpolation method, which is solved by the sweep method.

A block diagram for the numerical solution of these equations was written, which greatly facilitates the understanding of the entire structure of such a model and makes it possible to conduct a computational experiment for any user.

Keywords: ionosphere, calculations, equations, mathematical model, temperature, concentration, electrons, ions, validation, verification, identification.

For citation: Anton D. Kolin, Vladimir V. Medvedev, Scheme for constructing a computational experiment for calculating the climatic and ionospheric parameters of the Earth, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 273—277. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.036

Введение

Для облегчения работы на сложной математической модели, которой является представляемая модель и ранее разработанные авторами [1-4], а также модели [5-7] должны быть подвергнуты ее автоматизации, иначе использование их в практических целях проведения вычислительных экспериментов крайне затруднено или практически невозможно. Для этого пользователю модели необходимо выдавать список параметров программы, число и форма их выдачи должна удовлетворить пользователя. Программа

должна сопровождаться описанием, по которому пользователь может ее прочесть, должна удовлетворять конкретным условиям организации, обеспечиваться входной информацией (список параметров необходимый для эксплуатации), должна обладать инструкцией, убедительно проверена на достоверность результата. Пользователю определяет сложность и величину программы. Данная модель построена на трех основных законах сохранения физики – массы, импульса, энергии и законах вычислительной математики – консервативности, принципа

максимума. Таким образом целью данной работы является правильное написание системы дифференциальных уравнений, описывающих мезосферу, термосферу и ионосферу, а также метод их решения и проверку правильности полученных результатов, что и составляет валидация, верификация, идентификация.

Мезосферно-термосферная модель

Основными физическими процессами характеризующие эту область высот(50-500км), являются турбулентное перемешивание, конвективный перенос и молекулярная диффузия. Указанные процессы для идеального газа описываются сложной системой дифференциальных уравнений основанные на основных законах сохранения (массы, импульса, энергии).

Уравнение неразрывности для нейтрального газа[1]:

$$\frac{\partial n_\alpha}{\partial t} + \bar{v}(n_\alpha V_\alpha) = \sum_\beta k_{\alpha\beta} \quad (1)$$

Уравнение переноса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{V}_n}{\partial t} + (\bar{V}_n \text{grad}) V_n = \nabla G - \frac{1}{\rho_n} \text{grad} P_n - \\ - \frac{1}{\rho_n} \sum_j n_j R_j (\bar{V}_n - V_j) + 2(\bar{V}_n \cdot \Omega) + \\ + \nabla \frac{\eta}{\rho_n} \nabla \bar{V}_n + \frac{1}{3\rho_n} \text{grad} \eta \text{div} \bar{V}_n, \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнение теплового баланса нейтрального газа [3]:

$$\begin{aligned} \rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_r \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \sum_{i=1}^k \rho_i c_{p_i} U_i \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{dP}{dt} + \frac{\partial}{\partial z} * \\ * \left[\rho c_p K_h \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma \right) \right] - \rho c_p W \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma \right) + \rho \epsilon_d + Q, \end{aligned} \quad (3)$$

$$P = n \cdot k \cdot T \quad (4)$$

Суммарная концентрация положительных и отрицательных ионов-связок рассчитывается по уравнению:

$$\frac{d[Y^\pm]}{dt} = P^\pm - \alpha^\pm [Y^\pm]. \quad (5)$$

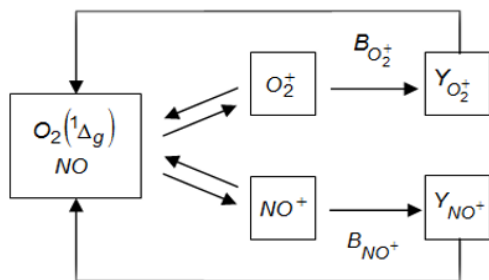


Рис. 1. Упрощенная модель D-области для положительных ионов[8-9]

Упрощенная схема для отрицательных ионов, была построена авторами работы, на основе работ [10-12]:

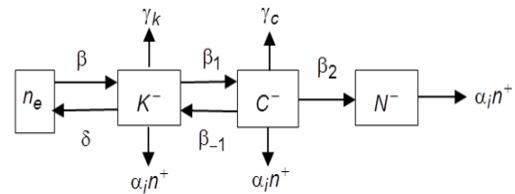


Рис. 2. Упрощенная модель D-области для отрицательных ионов

В данном уравнении принята следующая скорость образования положительных ионов связок и коэффициент потерь:

$$\begin{aligned} P^+ = B_{NO^+} [NO^+] + B_{O_2^+} [O_2^+], \\ \alpha^+ = \alpha_{Y^+} [N_e] + \alpha [Y^-], \end{aligned}$$

где $\alpha_{Y^+} = 10^{-5} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$, $\alpha = 10^{-7} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$,

$$B_{O_2^+} = 1.5 \cdot 10^{-2} \left(\frac{3 \cdot 10^{10} [O]}{1.5 \cdot 10^9 [H_2O]} + 1 \right),$$

$$B_{NO^+} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}.$$

Для отрицательных ионов-связок:

$$P^- = \bar{x} [O_2^-], \alpha^- = [Y^+] * 10^{-7} + \gamma.$$

Уравнение (5) можно записать в виде:

$$\frac{dN_i}{dt} = P_i - \alpha_{ik} N_i, \quad (6)$$

Данное уравнение решалось численно по неявной схеме:

$$N_i^{j+1} = (P_i - \alpha_{ik} N_i^j) / (1/\tau + \alpha_{ik}), \quad (7)$$

где j-индекс ионов по времени; i, k-индексы компонент.

Ионосферная модель E и F-области ионосферы:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla(n_i V_i) = Q_i - L_i, \quad (8)$$

$$n_e = \frac{1}{e} \sum_i e_i n_i, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} n_i m_i \left[\frac{dV_i}{dt} + \Omega \times (\Omega \times r) + 2\Omega \times V_i \right] = \\ = -\nabla(n_i k T_i) + n_i m_i g + \\ + n_i e_i (E + V_i \times B) - \sum_n n_i m_i v_{in} (V_i - V_n) \\ - \sum_{k \neq i} n_i m_i v_{ik} (V_i - V_k) - n_i k \beta_i \nabla T_i, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{dV_e}{dt} = 0 = -\nabla(n_e k T_e) - n_e e (E + V_e \times B) - n_e k \alpha \nabla T_e, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} n_i k \frac{dT_i}{dt} + n_i k T_i \nabla V_i - \nabla(\lambda_i \nabla T_i) = n_i m_i \left\{ \sum_n \frac{v_{in}}{m_i + m_n} \times \right. \\ \left. \times [3k(T_n - T_i) + m_n (V_n - V_i)^2] + \right. \end{aligned}$$

$$+ \sum_{k \neq i} \frac{v_{ik}}{m_i + m_k} \{ 3k(T_k - T_i) + m_k(V_k - V_i)^2 \} + \frac{v_{ie}}{m_i} 3k(T_e - T_i) \}, \quad (12)$$

$$\frac{3}{2} n_e k \frac{dT_e}{dt} + n_e k T_e \nabla V_e - \nabla(\lambda_e \nabla T_e) = 3k n_e m_e \times \left[\sum_n \frac{v_{en}}{m_n} (T_n - T_e) + \sum_i \frac{v_{ei}}{m_i} (T_i - T_e) \right] + P_e + W_e \quad (13)$$

Численные методы решения уравнения

Данная нелинейная связанная система уравнений решалась численно методом конечных разностей [13-15] с использованием методом группировки [16] и скорректированным нами [3-4].

Автоматизация процесса вычислений

Приведенная выше система уравнений и численные методы их решения сложно реализовать.

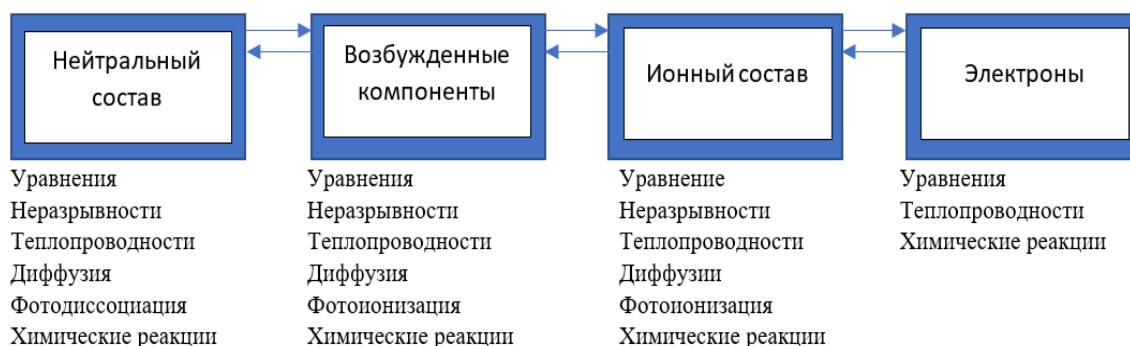


Рис. 3. Схема модульного решения

Заключение

В данной статье предложен возможный вариант автоматического управления в вычислительном эксперименте по расчету параметров ближнего космоса. Полученные результаты на предложенном автоматическом варианте вычислительного эксперимента опубликованные в ранних работах

Для упрощения реализации автором предлагается модульное решение задачи. Схема представлена на Рис. 3. Данная схема реализована в виде блочной структуры программы, которая состоит из управляющей программы, в которую включены блоки решения каждого уравнения, последовательность и методы их решения лежат на вычислителе. Возможные варианты проверки полученного вычисления (натурный эксперимент, аналитическое решение и т. д.)

Анализ результата

Идентификация полученных результатов путем вычислительного эксперимента для различных гелиофизических условий проводился путем сравнения с экспериментальными данными, показал удовлетворительные результат, которые представлены в работах [1-4].

авторов [1-4] находятся в удовлетворительном согласии с результатами современных, отечественных работ [5-7] с учетом несовпадения некоторых гелио-геофизических условий, а так же необходимо отметить, что результаты полученные в этих работах не автоматизированы (авторы этих работ не упоминают автоматизацию).

Литература

1. Медведев В.В., Еремичева В.Е., Тимофеева И.В. Результаты численного расчета высотного распределения кислородных компонентов верхней атмосферы Земли // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – Т. 1. – №3. – С. 163-167.
2. Медведев В.В., Еремичева В.Е., Колин А.Д. Математическое моделирование реакций нижней области ионосферы для возмущенных условий. // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – Т.3. – №4. – С. 154-158.
3. Медведев В.В., Колин А.Д. Системный анализ математического моделирования теплопроводности нейтрального газа верхней атмосферы земли // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – Т.2. – №4. – С. 136-141.
4. Медведев В.В., Еремичева В.Е., Колин А.Д. Численное моделирование сильного воздействия на ионосферную плазму // Морские интеллектуальные технологии. – 2021 г. – Т. 4. – № 4. – С. 165-169.
5. Кулямин Д.В., Останин П.А., Дымников В.П. Моделирование F слоя Земной ионосферы. Решение уравнений амбиполярной диффузии // Математическое моделирование. – 2019. – Т. 31. – № 4. – С. 57-74.
6. Дышлевский С.В., Беликов Ю.Е. Особенности переноса излучения в водородной линии Лайман-альфа и их возможная связь с изменениями электронной концентрации в D-области ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. – 2020. – Т. 60. – № 3. – С. 344-354
7. Дымникова В.П., Кулямина Д.В., Останин П.А. Совместная модель глобальной динамики термосферы и ионосферы земли // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 56. – № 3. – С. 280-292
8. Кудрявцев В.П. Вариации аэрномических параметров в верхней части области D. // Геомагнетизм и аэрномия. – 1989. – Т. 29. – № 5. – С. 812-817.

9. Кудрявцев В.П. Эффективные скорости образования положительных ионов-связок в D-области ионосферы. // Геоматематизм и аэрономия. – 1989. – Т. 29. – № 5. – С. 805-811.
10. Мак-Ивен М., Филипс Л. Химия атмосферы. – М.: Мир, 1978. – с. 375.
11. Брасье Г., Соломон С. Аэрономия средней атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – с. 457.
12. Кошелев В.В., Климов Н.Н., Сутырин Н.А. Аэрономия мезосферы и нижней термосферы. М.: Наука, 1983. – с. 182.
13. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. – М, УРСС, 2004. – с.250
14. Вабищевич П.Н. Монотонные разностные схемы для задач конвекции-диффузии // Журнал дифференциальные Уравнения. – 1994. – Т. 30. – № 3. – С. 503-513.
15. Холодов А.С. О построении разностных схем с положительной аппроксимацией для уравнений параболического типа // Журнал Вычислительная математика и математическая физика. – 1984. – Т. 24. – № 9. – С.156-163.
16. Кареткина Н.В. Безусловно устойчивая разностная схема для параболических уравнений, содержащих первые производные. // Журнал Вычислительная математика и математическая физика. – 1980. – Т. 20. – С. 236-240.

References

1. Medvedev V.V., Eremicheva V.E., Timofeeva I.V. Rezul'taty chislennoho rascheta vysotnogo raspredeleniya kislorodnykh komponentov verkhney atmosfery Zemli [The results of calculations of the altitude distribution of oxygen components of the upper surface of the Earth]. Morskije intellektual'nye tekhnologii, 2017, t. 1, № 3, s. 163-167.
2. Medvedev V.V., Eremicheva V.E., Kolin A.D., Matematicheskoe modelirovanie reakcij nizhnej oblasti ionosfery dlja vozmushhennykh uslovij [Mathematical modeling of reactions of the lower ionosphere for disturbed conditions]. Morskije intellektual'nye tekhnologii 2018. №4 T.3. s. 154-158.
3. Medvedev V.V., Kolin A.D., Sistemnyy analiz matematicheskogo modelirovaniya teploprovodnosti neytral'nogo gaza verkhney atmosfery zemli [System Analysis of Mathematical Modeling of the Thermal Conductivity of the Neutral Gas of the Earth's Upper Atmosphere]. Morskije intellektual'nye tekhnologii 2020, №4 t.2, s. 136-141.
4. Medvedev V.V., Eremicheva V.E., Kolin A.D Chislennoe modelirovanie sil'nogo vozdeystviya na ionosfernuju plazmu[Numerical modeling of a strong impact on the ionospheric plasma]. Morskije intellektual'nye tekhnologii. 2021 g. 2021. T. 4. № 4. S. 165-169.
5. Kulyamin D.V., Ostanin P.A., Dymnikov V.P. Modelirovanie F sloya Zemnoj ionosfery. Reshenie uravnenij ambipolyarnoj diffuzii[Modeling of the F layer of the Earth's ionosphere. Solution of the ambipolar diffusion equations]. Matematicheskoe modelirovanie, 2019, T. 31, № 4, s. 57-74.
6. Dyshlevskij S.V., Belikov YU.E. Osobennosti perenosa izlucheniya v vodorodnoj linii Lajman-al'fa i ih vozmozhnaya svyaz' s izmeneniyami elektronnoj koncentracii v D-oblasti ionosfery[Features of radiative transfer in the Lyman-alpha hydrogen line and their possible relationship with changes in the electron density in the D-region of the ionosphere]. Geomagnetizm i aeronomiya, 2020, T. 60, № 3, s. 344–354.
7. Dymnikova V.P., Kulyamina D.V., Ostaninc P.A. Sovmestnaya model' global'noj dinamiki termosfery i ionosfery zemli[Joint model of global dynamics of the thermosphere and ionosphere of the earth]. Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana, 2020, T. 56, № 3, s. 280–292
8. Kudrjavcev V.P. Variacii ajeronomicheskikh parametrov v verhnej chasti oblasti D.[Variations in aeronomic parameters in the upper part of region D]. Geomagnetizm i ajeronomija, 1989, T. 29, № 5, s. 812-817.
9. Kudrjavcev V.P. Jeffektivnye skorosti obrazovaniya polozhitel'nyh ionov-svjazok v D-oblasti ionosfery[Effective Rates of Formation of Positive Binding Ions in the D-Region of the Ionosphere]. Geomagnetizm i ajeronomija. 1989, T. 29, № 5, s. 805-811.
10. Mak-Iven M., Filips L. Himija atmosfery[Atmospheric chemistry]. M.: Mir, 1978, s. 375.
11. Bras'e G., Solomon S. Ajeronomija srednej atmosfery[Aeronomy of the middle atmosphere]. L.: Gidrometeoizdat, 1987, s. 457.
12. Koshelev V.V., Klimov N.N., Sutyryn N.A.. Ajeronomija mезosfery i nizhnej termosfery[Aeronomy of the mesosphere and lower thermosphere]. M.: Nauka, 1983, 182 s.
13. Samarskij A.A., Vabishhevich P.N. Chislennyye metody resheniya obratnykh zadach matematicheskoy fiziki[Numerical methods for solving inverse problems of mathematical physics]. M, URSS, 2004, 250 c.
14. Vabishhevich P.N. Monotonnye raznostnye shemy dlja zadach konvekcii-diffuzii[Monotone difference schemes for convection-diffusion problems]. Zhurnal differencial'nye Uravnenija, 1994, tom 30, № 3, s 503-513.
15. Holodov A.S. O postroenii raznostnykh shem s polozhitel'noj approksimaciej dlja uravnenij parabolicheskogo tipa [On the Construction of Difference Schemes with Positive Approximation for Equations of Parabolic Type]. Zhurnal Vychislitel'naja matematika i matematicheskaja fizika, 1984, t. 24, № 9, s. .156-163.
16. Karetkina N.V. Bezuslovno ustojchivaja raznostnaja shema dlja parabolicheskikh uravnenij, soderzhashhih pervye proizvodnye [An unconditionally stable difference scheme for parabolic equations containing first derivatives]. Zhurnal Vychislitel'naja matematika i matematicheskaja fizika, 1980, t. 20, s. 236-240

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Васильевич Медведев, доктор физико – математических наук, профессор кафедры информатики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Калининградский технический университет», 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: vmedvedev2012@mail.ru

Vladimir V. Medvedev, Dr. Sci. (Phys.-Math)., Professor of Department of Informatics and Information technologies, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: vmedvedev2012@mail.ru

Антон Дмитриевич Колин, старший преподаватель кафедры информатики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Калининградский технический университет», 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: yojik14@gmail.com

Anton D. Kolin, Senior Lecturer of Department of Informatics and Information technologies, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: yojik14@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.01.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.01.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 25.01.2023.

Научная статья

УДК 656.615

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.037>

Аналитическая симуляционная модель произвольной системы массового обслуживания

А.Л. Кузнецов¹ thunder1950@yandex.ru, А.В. Кириченко¹ KirichenkoAV@gumrf.ru,

А.Д. Семенов¹ asemyonov054@gmail.com, И.В. Русинов¹ kaf_pgt@gumrf.ru

¹Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Аннотация. В практике технологического проектирования морских торговых портов расчетно-аналитические методы, оперирующие с детерминированными величинами, часто оказываются недостаточными. В ряде случаев искомое расширение может быть получено за счёт привлечения методов статистического моделирования (методов группы Монте-Карло), в иных случаях решение дают методы теории массового обслуживания. Использование канонических формул теории массового обслуживания осложняется весьма жесткими ограничениями на характер входного потока и параметры моделируемой системы. Более адекватным расширением является использование имитационного симуляционного моделирования, в частности, объектно-ориентированного. В то же время имитационное симуляционное моделирование, хотя и является более адекватным приближением, но в реализации оказывается существенно более трудоемкой и узкоспециализированной методикой, поскольку соответствующие модели создаются «ad hoc», т. е. адекватными конкретному объекту в конкретных условиях. В данной работе предпринята попытка найти достаточно простое и в то же время универсальное решение, которое может быть использовано для широкого круга задач технологического моделирования разнообразных транспортных объектов и процессов.

Ключевые слова: проектирование морских портов, морской порт, теория массового обслуживания, автоматизация расчетов, имитационное моделирование

Для цитирования: Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Семенов А.Д., Русинов И.В. Аналитическая симуляционная модель произвольной системы массового обслуживания, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 278—281. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.037

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.037>

Analytical simulation model of a query system

Alexander L. Kuznetsov¹ thunder1950@yandex.ru, Alexander V. Kirichenko¹ KirichenkoAV@gumrf.ru,

Anton D. Semenov¹ asemyonov054@gmail.com, Igor V. Rusinov¹ kaf_pgt@gumrf.ru

¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

Annotation. In the practice of technological design of seaports, the analytical methods that use deterministic values often occur to be incorrect. In certain cases, the result could be precise with utilization of statistical modelling methods such as Monte-Carlo method. In other cases, the correct result could be gained with implementation of query theory methods. The traditional formulas of query theory are inconvenient as it sets certain requirements to the incoming flow and system's parameters. The more adequate decision is to use agent-based simulation modelling. At the same time this method requires more labor to implement it as these models are made "ad hoc", i.e., adequate to a certain object in certain circumstances. The article is dedicated to try to find the most simple and universal method of different transportation systems' technological modelling.

Key words: seaports design, seaport, query theory, calculations' automatization, simulation modelling

For citation: Aleksandr L. Kuznetsov, Aleksandr V. Kirichenko, Anton D. Semenov, Igor V. Rusinov Automatisation of seaports' approach channel design calculations, 2023. № 1 part 1, P. 278—281. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.037

Введение

Методический подход к исследованию работы грузовых терминалов, основанный на применении положений теории массового обслуживания (ТМО), применяется давно и традиционно [1, 2, 3]. Вместе с тем, с усложнением решаемых задач, проблемным вопросом становятся присущие ТМО ограничения, выраженные к требованиям к потоку заявок («однородный поток», «поток без последствий», «стационарный поток», «простейший поток», «поток

Эрланга» и др.). Адекватным решением может являться применение имитационного моделирования, однако известна его значительная трудоёмкость, иногда несоответствующая уровню решаемых оперативных задач [4, 5, 6]. Подобная практика поддерживается и современными иностранными исследователями [7, 8, 9].

Традиционная структура модели системы массового обслуживания (СМО) имеет вид показа на рис. 1.

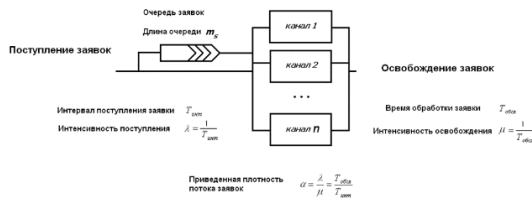


Рис. 2. Традиционная система массового обслуживания

На вход СМО поступает поток заявок, которые при наличии свободных каналов попадают на обслуживание. При всех занятых каналах поступившие в систему заявки становятся в очередь, из которой они выбираются по мере освобождения каналов. Общее число каналов и длительность обслуживания заявок определяет пропускную способность СМО.

При выполнении определённых жестких условий на случайные характеристики, входной поток становится простейшим, что позволяет выразить характеристики его обслуживания в СМО аналитическими, т. е. формульными зависимостями. В более сложных и более общих случаях получение этих характеристик требует построения специальной имитационной симуляционной модели, учитывающей логику внутренних процессов обслуживания поступления заявок и дисциплины очереди. Одним из самых полезных свойств описываемой в данной работе методики является отсутствие каких-либо ограничений на характеристики входного потока.

Модель системы массового обслуживания как «черного ящика»

Пусть на вход некоторой СМО поступает поток заявок произвольной природы. Время представляется дискретным, и количество поступивших в конкретный момент времени t заявок есть $i(t)$.

Заявки, поступившие в систему, либо немедленно принимаются в обслуживание, либо ставятся в очередь. Пропускная способность системы определяется количеством существующим количеством каналов и их производительностью, составляя величину P .

Именно это отличие – использование лишь внешней, априорной информации относительно выходного потока – позволяет отойти от рассмотрения специфики внутренних процессов обработки заявок в системе и оценивать их обработку через входы и выходы системы, что и составляет кибернетическое понятие «черного ящика». Как следствие, в отличие от традиционных представлений ТМО, количество каналов, их занятости, дисциплина обслуживания очереди и пр. не требуется принимать во внимание. Иными словами, это позволяет провести результативный анализ на макро-, а не микроскопическом уровне рассмотрения модели.

Формирование потока заявок, покидающих систему, в данном случае вообще не рассматривается, поскольку принятые в обслуживание заявки считаются автоматически покидающими систему через интервал времени, характеризующий длительность обработки.

По сути дела, целью предлагаемого метода, или алгоритма, является вынесение суждений о характеристиках обслуживания на основании только характеристик входного потока и значений пропускной способности системы. Опишем основные черты метода более подробно.

Алгоритмы формирования характеристик обслуживания

Пусть в момент времени T в некоторую систему поступает поток заявок в количестве $i(T)$. К этому моменту общее количество поступивших заявок составит значение $I(T) = \sum_{t=0}^T i(t)$. Аналогично общее количество принятых в обслуживание заявок есть $O(T) = \sum_{t=0}^{T-1} o(t)$, где $o(t)$ есть количество принятых в обслуживание заявок в предыдущие моменты времени.

Алгоритм функционирования рассматриваемой системы может быть в первом приближении описан следующим образом. Пусть пропускная способность системы составляет величину P . Тогда, если $I(T - 1) > O(T - 1)$, то в системе имеются заявки, требующие обслуживания.

Если при этом $I(T - 1) - O(T - 1) < P$, то к обслуживанию будут приняты все заявки, т. е. $o(T) = I(T - 1) - O(T)$, в противном случае их количество составит $o(T) = P$. Заявки в количестве $I(T - 1) - O(T) - P$ будут не приняты к обработке и останутся в очереди на обслуживание.

Приведенные рассуждения, по сути, описывают в самом общем виде логику работы абстрактной СМО самого общего вида. В то же время, на основании этих соотношений динамическое число принимаемых в обслуживание заявок может быть получено в виде несложных рекуррентных соотношений. Это может быть сделано даже за счет прямого использования указанных формул в среде MS EXEL

Графически поведение такой системы иллюстрирует рис. 2.

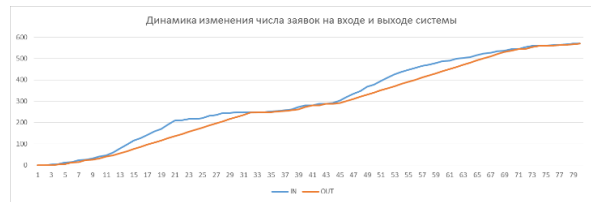


Рис. 3. Динамика поведения симулируемой системы массового обслуживания

Длина очереди, возникающей при реализации рассматриваемого в примере потока заявок, приведена на рис. 3.

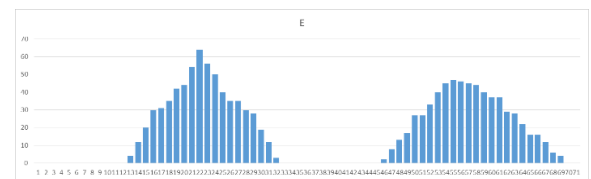


Рис. 4. Динамика поведения симулируемой системы массового обслуживания

Как видно из приведенных данных, реализованная простейшая модель позволяет работать не с простейшим потоком заявок, а

допуская поступление их в произвольном числе в каждый момент времени.

Выводы

1. При проектировании транспортных систем на разных уровнях абстракции возникает необходимость обойти ограничения, присущие аналитическим (формульным) зависимостям и их расширениями, получаемыми использованием статистического моделирования (методами группы Монте-Карло).

2. Более адекватным решением для целого класса подобных задач является использование моделей теории массового обслуживания, которые, в свою очередь, ограничены детскими требованиями к природе потока заявок.

3. Использование программного продукта, основанного на имитационном моделировании внутренних процессов, происходящих в системах массового обслуживания специального вида, является решением, трудоемкость которого иногда не оправдывает повышение точности результатов.

4. Предлагаемый метод аналитического моделирования систем массового обслуживания самого общего вида не заменяет ни одного из перечисленных методов, но может использоваться как эффективное и результативное дополнение к инструментарию математических средств технологического проектирования транспортных объектов.

Литература

1. Бабури В. А., Минеев С. К., Бабурина К. Р. Оптимизация параметров морского транспортного узла // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2012. – № 2 (14). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-parametrov-morskogo-transportnogo-uzla> (дата обращения: 13.02.2023).
2. Янченко А. А. Научные подходы к исследованию процессов функционирования морских портов и портовых терминалов // Научные проблемы водного транспорта. – 2018. – № 55. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nauchnye-podhody-k-issledovaniyu-protsessov-funktsionirovaniya-morskih-portov-i-portovyh-terminalov> (дата обращения: 13.02.2023).
3. Васин А. В., Захаров Д. С., Анненков Л. В. Моделирование оптимальной конфигурации морского порта // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2019. – № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-optimalnoy-konfiguratsii-morskogo-porta> (дата обращения: 13.02.2023).
4. Кузнецов А. Л., Кириченко А. В., Щербакова-Слюсаренко В. Н. Имитационное моделирование в задачах анализа операций в морских портах // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2018. – № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-v-zadachah-analiza-operatsiy-v-morskih-portah> (дата обращения: 13.02.2023).
5. Валькова С. С., Васильев Ю. И. Методика оценки склада морского порта методами имитационного моделирования // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2019. – № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-otsenki-sklada-morskogo-porta-metodami-imitatsionnogo-modelirovaniya> (дата обращения: 13.02.2023).
6. Кузнецов А. Л., Сампиев А. М., Семенов А. Д., Кириченко А. В. Направление совершенствования норм технологического проектирования морских портов // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. – 2022. – № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/napravlenie-sovershenstvovaniya-norm-tehnologicheskogo-proektirovaniya-morskih-portov-1> (дата обращения: 13.02.2023).
7. Ines Reki, Sabeur Elkosantini. A multi agent system for the online container stacking in seaport terminals. Journal of Computational Science. Volume 35, July 2019, Pages 12-24. DOI: 10.1016/j.jocs.2019.06.003.
8. Yu-Chung Tsao, Vo-Van Thanh. A multi-objective mixed robust possibilistic flexible programming approach for sustainable seaport-dry port network design under an uncertain environment. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. Volume 124, April 2019, Pages 13-39. DOI: 10.1016/j.tre.2019.02.006.
9. Mohamed Nezar Abourraja, Nicole Kringos, Sebastiaan Meijer. Exploiting simulation model potential in investigating handling capacity of Ro-Ro terminals: The case study of Norvik seaport. Simulation Modelling Practice and Theory. Volume 117, May 2022, 102513. DOI: 10.1016/j.simpat.2022.102513.

References

1. Baburin V. A., Mineev S. K., Baburina K. R. Optimizatsiya parametrov morskogo transportnogo uzla [The optimization for sea transport hub settings] // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova. – 2012. – № 2 (14). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-parametrov-morskogo-transportnogo-uzla> (data obraschenija: 13.02.2023).
2. Janchenko A. A. Nauchnye podhody k issledovaniyu protsessov funktsionirovaniya morskikh portov i portovyh terminalov [Scientific approaches to the sea ports and port terminals operating processes study] // Nauchnye problemy vodnogo transporta. – 2018. – № 55. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nauchnye-podhody-k-issledovaniyu-protsessov-funktsionirovaniya-morskih-portov-i-portovyh-terminalov> (data obraschenija: 13.02.2023).
3. Vasin A. V., Zaharov D. S., Annenkov L. V. Modelirovanie optimal'noj konfiguratsii morskogo porta [Modeling the optimal seaport configuration] // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova. – 2019. – № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-optimalnoy-konfiguratsii-morskogo-porta> (data obraschenija: 13.02.2023).
4. Kuznetsov A. L., Kirichenko A. V., Scherbakova-Sljusarenko V. N. Imitatsionnoe modelirovanie v zadachah analiza operatsij v morskikh portah [Simulation in the tasks of sea port operational analyses] // Vestnik gosudarstvennogo

- universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova. – 2018. – № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-v-zadachah-analiza-operatsiy-v-morskih-portah> (data obraschenija: 13.02.2023).
5. Val'kova S. S., Vasil'ev Ju. I. Metodika otsenki sklada morskogo porta metodami imitatsionnogo modelirovaniya [A methodology for assessing the seaport warehouses using the imitation modeling methods] // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova. – 2019. – № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-otsenki-sklada-morskogo-porta-metodami-imitatsionnogo-modelirovaniya> (data obraschenija: 13.02.2023).
 6. Kuznetsov A. L., Sampiev A. M., Semenov A. D., Kirichenko A. V. Napravlenie sovershenstvovanija norm tehnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov [Directions of seaport technological rules development] // Vestnik AGTU. Serija: Morskaja tehnika i tehnologija. – 2022. – № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/napravlenie-sovershenstvovanija-norm-tehnologicheskogo-proektirovaniya-morskikh-portov-1> (data obraschenija: 13.02.2023).
 7. Ines Rekik, Sabeur Elkosantini. A multi agent system for the online container stacking in seaport terminals. Journal of Computational Science. Volume 35, July 2019, Pages 12-24. DOI: 10.1016/j.jocs.2019.06.003.
 8. Yu-Chung Tsao, Vo-Van Thanh. A multi-objective mixed robust possibilistic flexible programming approach for sustainable seaport-dry port network design under an uncertain environment. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. Volume 124, April 2019, Pages 13-39. DOI: 10.1016/j.tre.2019.02.006.
 9. Mohamed Nezar Abourraja, Nicole Kringos, Sebastiaan Meijer. Exploiting simulation model potential in investigating handling capacity of Ro-Ro terminals: The case study of Norvik seaport. Simulation Modelling Practice and Theory. Volume 117, May 2022, 102513. DOI: 10.1016/j.simpat.2022.102513.

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 Львович Кузнецов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры портов и грузовых терминалов, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Aleksandr L. Kuznetsov, professor, Dr. Sci. (Eng), Professor of the Department of Ports and Cargo Terminals, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Александр Викторович Кириченко, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры портов и грузовых терминалов, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: KirichenkoV@gumrf.ru

Aleksandr V. Kirichenko, professor, Dr. Sci. (Eng), Head of the Department of Ports and Cargo Terminals, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: KirichenkoAV@gumrf.ru

Антон Денисович Семенов, аспирант, научный руководитель – Кузнецов Александр Львович, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: asemyonov054@gmail.com

Anton D. Semenov, postgraduate, scientific advisor – Kuznetsov Aleksandr L., Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: asemyonov054@gmail.com

Игорь Владимирович Русинов, аспирант, научный руководитель – Кириченко Александр Викторович, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

Igor V. Rusinov, postgraduate, scientific advisor – Kirichenko Aleksandr V., Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: kaf_pgt@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.01.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.02.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 25.21.2023.

Научная статья

УДК 004.896

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.038>

Исследование вопроса безопасного сближения судов на основе нечёткой модели

М.Н. Лютикова¹ mnlyutikova@mail.ru, С.И. Панькина¹ sipankina@mail.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация: Актуальным на сегодняшний день с учетом интенсивности судоходства и быстрого развития навигационного обеспечения выступает формализация и описание характеристик динамической системы организации оптимального управления судном на основе использования современного программного обеспечения. В работе рассматриваются вопросы определения степени опасности чрезмерного сближения или определение вероятности возможного столкновения судов для принятия оптимального решения или экстренных мер. При этом, конструктивной выступает технология применения нечеткого моделирования с использованием нейросетевых технологий. Целью данной статьи является исследование модели расхождения судов на основе нечетких нейросетевых технологий, обеспечивающей принятие оптимальных решений по различным аспектам навигационных задач. Формирование сценариев движения в данной работе рассматривается при выборе пары судов, введения интервальных оценок в описании параметров движения судна, позволяющих учитывать неполноту или неточность имеющейся информации. На основе построенной продукционной модели, опирающейся на Международные правила предотвращения столкновений судов в море (МППСС-72) и другие регламентирующие документы, объекты соотносятся к различным категориям опасности и позволяют провести комплексную оценку безопасности навигационной ситуации.

Ключевые слова: судно, моделирование, нечеткая логика, вероятность опасности, время сближения, дистанция сближения, безопасность судовождения.

Для цитирования: Лютикова М.Н., Панькина С.И. Исследование вопроса безопасного сближения судов на основе нечеткой модели. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 282—290. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.038

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.038>

Investigation of the issue of safe approach of ships based on the fuzzy model

Marina N. Lyutikova¹ mnlyutikova@mail.ru, Svetlana I. Pankina¹ sipankina@mail.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. The paper deals with the issues of determining the degree of danger of excessive convergence or determining the likelihood of a possible collision of ships in order to make an optimal decision or emergency measures. At the same time, the technology of using Fuzzy modeling using neural network technologies is constructive. The purpose of this article is to study the ship divergence model based on Fuzzy Logic and Neural network technologies, which ensures the adoption of optimal decisions on various aspects of navigation tasks. The formation of motion scenarios in this paper is considered when choosing a pair of ships, introducing interval estimates in the description of the ship's motion parameters, which allow taking into account the incompleteness or inaccuracy of the available information. On the basis of the constructed production model, based on the International Rules for the Prevention of Collisions at Sea and other regulatory documents, objects are related to various hazard categories and allow for a comprehensive assessment of the safety of the navigation situation.

Keywords: vessel, modelling, fuzzy logic, hazard probability, closest point of approach (CPA), head-on situation, navigational safety.

For citation: Marina N. Lyutikova, Svetlana I. Pankina, Investigation of the issue of safe approach of ships based on the fuzzy model. 2023. № 1 part 1, P. 282—290. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.038

Введение

Большое количество аварийных ситуаций на мировом флоте все еще остается одной из актуальных тем исследований. Сложность задачи безопасного судовождения заключается в ее многофакторности. Одним из наиболее значимых факторов выступает наличие ошибок в оценке создавшейся навигационной обстановки, правильной степени опасности этого процесса.

Нередко судоводителям приходится принимать ответственные решения в экстренных ситуациях, в обстановке не полной или не точной информации.

Например, при движении судна в открытом море можно выделить ряд характеристик, рассматриваемых при оценке сближения и расхождения судов:

- скорости судов;

- расстояние между судами в момент кратчайшего сближения;
- время движения судна до кратчайшего сближения;
- маневренность судов;
- безопасная дистанция расхождения;
- безопасное время расхождения;
- дистанция отхода от линии первоначального курса и др.

В настоящее время автоматизация управлением судном позволяет на основе использования искусственного интеллекта (Artificial Itelligence), нейросетевых технологий (Neural networks), гибридных систем (Hybrid system) дать наиболее точную характеристику об опасности при сближении судов.

Анализ работ показал, что многие авторы в своих научных трудах рассматривают применение нейросетевых технологий в судовождении в задачах определения параметров движения судна и обработки навигационной информации, приводят ряд моделей и алгоритмов по управлению движением, учитывающем различные факторы.

В исследовании [1] авторами рассматривается три модели оценки степени опасности столкновения судов, отличающиеся входными параметрами, получаемыми с радиолокационной станции: пеленге и дистанции, дистанции и времени сближения; пеленге, скорости и курсе судна-цели. При этом, каждая модель исследована в нечетком и нейро-нечетком базисах, и для каждой модели проведено оценивание качества.

Разработке модели, позволяющей осуществлять контроль местоположения судна в условиях недостаточной навигационной информации, посвящена работа [2]. Предложенный автором способ контроля местоположения судна с помощью нечетких чисел позволяет сформировать систему оценки параметров вектора состояния судна, как в составе интегральных навигационных систем.

Определенный интерес представляет научный труд [3], в которой предлагается использование нейронных сетей для организации визуального наблюдения на мостике, с целью помощи судоводителя в принятии решений.

Анализ процессов, операций и действий по предупреждению столкновения судов когнитивными методами, разработка алгоритмов, основанных на принципах искусственного интеллекта, проводится в работе [4].

Рассмотрение проблемы управления коллективным движением морских судов на основе нечеткой системы принятия решений предлагается авторами в работе [5], а также описывается алгоритм выработки тревожных сигналов различного типа в соответствии с уровнем опасности «судно-судно».

Вопросы создания адаптивных систем управления судном с заданной вероятностью обеспечивающих качество управления на базе нейросетевых технологий исследуются в работе [6].

Большой анализ российских и зарубежных работ по использованию нейросетевых технологий в судовождении, гибридных нейро-нечетких систем при моделировании динамики судна представлен в научном труде [7].

Актуальность выбранной нами темы обусловлена:

- рядом недостатков в использовании традиционных методов определения мер по безопасному расхождению судов;
- увеличением и сложностью существующих систем и процессов управления движением судна;
- необходимость учета большего числа различных факторов, влияющих на процесс принятия решений в сложившихся ситуациях.

Предметом нечеткой логики выступают исследования по принятию решения в условиях нечеткости или неопределённости информации. Технологии и алгоритмы, разработанные в рамках этих теорий, являются универсальными по применимости.

Этапы процесса нечеткого моделирования включают в себя:

- изучение и анализ проблемной ситуации;
- сбор информации и её структурирование;
- построение нечеткой модели;
- вычислительная часть эксперимента с нечеткой построенной моделью;
- необходимая корректировка нечеткой модели на основе полученных результатов;
- применение результатов исследования построенной нечеткой модели.

Данные этапы нечеткого моделирования позволили определить цель экспериментальной работы и сформулировать задачи:

- изучить вопрос построения математической модели на основе теории нечетких множеств;
- разработать и описать математическую модель первоначальной оценки опасности столкновения морских судов на основе теории нечетких множеств;
- на основании правил МПСС-72 ввести, обосновать и математически описать лингвистические переменные, определить универсальные множества для каждой переменной;
- на основании программы MATLAB в среде Fuzzy Logic реализовать математическую модель системы первично оценки опасности сближения судов;
- продемонстрировать возможность практического использования технологии нечеткого моделирования в среде MATLAB с целью получения параметров в рамках исходных данных.

Материалы и методы

Для системной модели процесс функционирования представляется в виде некоторой последовательности состояний с возможными переходами.

Применительно к теме нашего исследования под моделью будем понимать некоторую систему, отражающую наиболее существенные закономерности ее структуры и процесса функционирования, связанные с информационными и логическими модельными системами.

Одним из характерных признаков сложности построения различных математических моделей является некоторая неопределенность в поведении системы (оригинала) или ее структуры. К числу неопределенностей относится:

- неоднозначность использования отдельных терминов или неоднозначности некоторых понятий;

- неполнота отдельных представлений в сложных системах;
- противоречивость отдельных требований или модельных представлений в сложных системах;
- неопределенность наступления отдельных событий;
- неоднозначность анализа процесса поведения системы;
- нечеткое («размытое») описание границы системы или некоторых ее состояний.

Таким образом, нечеткая модель системы-оригинала будет характеризоваться неопределенностью (нечёткостью, неточностью) отдельных ее состояний, входных и выходных элементов воздействия (рисунок 1).



Рис. 1. Виды неопределенностей

Поэтому очевидно, что для моделирования тех или иных аспектов неопределенностей, отличных по своей природе, целесообразно использовать, как и теорию вероятностей, так и теорию нечетких множеств. Понятие нечеткого множества позволяет обеспечить адекватной информацией относительно неточных описаний различных ситуаций и используется для решения большинства проблем, в которых неопределенность характеризуется неоднозначностью суждений.

Разработка и применение систем нечеткого вывода, выполняемая на основе теории нечеткой логики, состоит из ряда этапов (рисунок 2) [8]:

- «Knowledge base» – формирование базы правил нечёткого вывода;
- «Fuzzification» – фаззификация входных переменных;
- «Inference» – агрегирование подусловий, активизация подзаключений, аккумуляция заключений в нечетких правилах;
- «Defuzzification» – дефаззификация выходных переменных.

Под фаззификацией понимается процесс нахождения значений функции принадлежности нечетких множеств, на основе полученных исходных данных. В процессе «Aggregation» определяется степень истинности условий по каждого отдельному правилу из системы нечеткого вывода В процессе «Activation» проводится процедура нахождения степени истинности каждого подзаключения из правил системы нечеткого вывода Процесс «Accumulacion» представляет процесс нахождения функции принадлежности для каждой выходной ЛП. Под дефаззификацией понимается процесс нахождения обычного числового значения для каждой из полученных выходных ЛП системы нечеткого вывода.

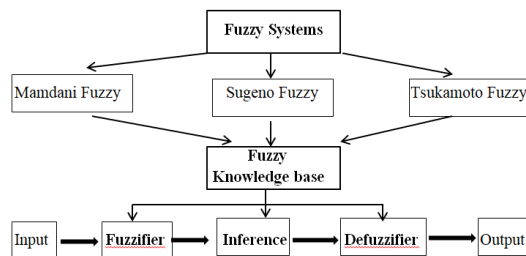


Рис. 2. Этапы системы нечеткого вывода

По алгоритму Сугено (Sugeno) формально можно выделить следующие этапы [9]:

- Формирование базы правил систем нечеткого вывода. В базе правил используются только правила нечетких продукций в форме:
«ЕСЛИ «β₁ есть α» И «β₂ есть α» ТО «w = ε₁ · a₁ + ε₂ · a₂»», где ε₁, ε₂ – весовые коэффициенты, а значение выходной переменной w в заключении определяется как некоторое действительное число.
- Агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций.
- Активизация подзаключений в нечетких правилах продукций.
- Аккумуляция заключений нечетких правил продукций.

При дефаззификации выходных переменных используется модифицированный вариант в форме метода центра тяжести для одноточечных множеств.

При решении практических задач нечеткого моделирования могут одновременно использоваться несколько алгоритмов нечеткого вывода с целью получения наиболее адекватных результатов.

Описание навигационных ограничений

Анализ обстановки при сближении двух судов в море или узкостях преследует цель определение степени опасности чрезмерного сближения или определение вероятности возможного столкновения судов для принятия оптимального решения или экстренных мер. Для предотвращения аварийных ситуаций необходимо получить верную и полную информацию об обстановке, на основании которой можно заблаговременно рассчитать дальнейший маневр расхождения не только с одним судном, но и с несколькими судами.

Поскольку МППСС-72 регламентируют взаимодействие судов попарно, то при составлении различных сценариев действий, построения модели расхождения судов на основе теории нечеткой логики, целесообразно рассматривать такой вид взаимодействия. Предварительная классификация судов по степени опасности по отношению к каждой паре судов позволяет в дальнейшем рассматривать варианты взаимодействия не только с собственным судном [10-11].

Если при решении некоторых задач судовождения математическими методами получить характеристики стохастических величин и процессов невозможно, то используют другие пути агрегирования информации в ее оценки. Особенностью задачи расхождения судов является необходимость привлечения для ее решения экспертных оценок, полученных в результате многолетнего опыта мореплавания.

Очевидно, что на основании хорошей морской практики судоводителем, меры на судах предпринимаются не только для исключения столкновений, но и для предупреждения чрезмерного сближения судов, или оптимального учета дистанции и времени при осуществлении маневра расхождения судов.

Конечно, в разных условиях плавания будут разные требования по дистанции кратчайшего сближения, устанавливаемые капитаном в документе Master's standing orders. Для примера, требования могут быть следующим:

- in the open ocean CPA of at least 2.0 nm;
- in the areas of moderate traffic CPA of at least 1.0 nm;
- in the coastal waters, channels and when passing/crossing of TSS keep CPA as much as practically possible. (CPA – closest point of approach).

Для оценки функционирования динамической системы необходимо рассмотреть вопрос безопасного расхождения каждой пары сближающихся судов и определить матрицы вероятностных характеристик, описывающих параметры безопасного расхождения.

Базовых параметров (расстояния и времени), используемых для нечетких рассуждений, достаточно для построения простой модели системы вывода. Понятно, что для дальнейших исследований следует учитывать и другие параметры, так как движение судна зависит от ряда характеристик: районы движения, состояние движения, погодные условия, состояние моря и др.

В судоводении, при оценке опасности сближения судов, под собственным судном понимается управляемое судоводителем судно, а по отношению к другим суднам применяется термин судно-цель.

Обнаружив наличие другого судна (судов) судоводитель должен прежде всего определить развивается ли ситуация чрезмерного сближения, необходимость или оптимальность маневрирования. Одним из способов оценки опасности столкновения является способ, строящийся на вычислении значений расстояния и времени кратчайшего сближения $D_{кр}$ и $T_{кр}$. Оценка опасности столкновения по этим параметрам основана на расчете через интервал времени Δt двух отсчетов полярных координат и сравнении их с допустимыми $D_{зад}$ и $T_{зад}$. Опасным будет считаться судно, если оно опасно по линейному фактору ($D_{кр} < D_{зад}$) и временному фактору ($T_{кр} < T_{зад}$).

В соответствии с правилами и на основании рекомендаций судоводителей [12-13] процесс расхождения судов представляется состоящим из 4 этапов, по следующим действиям:

- «Оценка обстановки» (AS – assessment of the situation) при дистанции между судами примерно от 120 до 80 кбт. Такая дистанция позволяет осуществить оценку обстановки и произвести расчет маневра расхождения «обязанным» судном, которое при необходимости уточнения обстоятельств устанавливает связь с «привилегированным» по УКВ-радиотелефону или АИС. Возможно исполнение маневра «привилегированным» судном, если оно считается целесообразным изменить взаимное

расположение судов и (или) свои курс и (или) скорость.

- «Манёвр расхождения» (DS – divergence of the situation) при дистанции примерно от 80 до 50 кбт. Данная дистанция с точки зрения хорошей морской практики позволяет выполнять маневр расхождения «обязанным» судном.

- «Угроза сближения» (TR – threat of rapprochement) при дистанции сближения начала маневра примерно от 40 до 25 кбт. На такой дистанции возникает угроза чрезмерного сближения, если «обязанное» судно не выполнило необходимые действия. Тогда «привилегированное» судно, прежде всего, должно установить с ним связь по УКВ-радиотелефону, АИС или подать сигналы с целью убедиться, что уступить дорогу судно не собирается. После этого на «привилегированном» судне рассчитывают и выполняют маневр расхождения судов на безопасной ситуации.

- «Угроза столкновения» (СТ – collision threat) при дистанции от 25 до 5 кбт и далее определяются более точно. Такая ситуация возможна при запоздалом или безуспешном маневре и требует от судов выполнения маневра последнего маневра. При этом, если столкновение все же неизбежно, то суда должны предпринять все действия и маневр для облегчения возможных последствий столкновения.

При расчете задачи расхождения временный фактор определяется временем, необходимым:

- для набора информации об обстановке и учета условий;
- на обработку полученных данных;
- на решение задачи по расхождению;
- по принятию решения (изменения курса или скорости);
- осуществлению маневра расхождения.

Результаты и обсуждение

Наиболее используемыми программными средствами на сегодняшний день, в которых реализуется теория нечеткого моделирования, является в системе MATLAB программы в среде Fuzzy Logic Toolbox и Fuzzy TECH [8].

Рассмотрим задачу по первоначальным оценкам ситуации и вероятностной характеристике опасности столкновения. При обнаружении судна-цели судоводитель должен первоначально определить, как будет развиваться ситуация сближения с этим судном, и принять решение по наилучшему маневрированию и предотвращению угрозы. Первоначальную оценку опасности столкновения проводим по вычисляемой дистанции сближения (DIS R – distention of rapprochement) и времени кратчайшего сближения (TIME R – time of rapprochement).

Разработанную нечеткую продукционную модель оценки первоначальной опасности столкновения судов реализуем на основе алгоритма типа Сугено в рамках ANFIS.

При этом, под нечеткой продукционной моделью первоначальной оценки опасности сближения мы будем понимать информационно логическую модель системы, построенную на основе теории нечетких множеств и нечеткой логики.

Разработанный алгоритм, основанный на теории использования нечетких множеств и, опирающейся на данные по хорошей морской практике

судоводителей, реализуется на языке нечеткой логики с полным описанием функций принадлежности, правил и интерпретации правил на практике.

Для изучения результатов разработки и функционирования системы нечеткой логики используем графические средства пакета Fuzzy Logic Toolbox, используемый при исследовании систем нечеткого вывода как графический язык автоматического программирования.

Данная модель состоит из двух входных лингвистических переменных (ЛП) и одной выходной переменной:

- первая входная ЛП β_1 определяет «Дистанцию сближения» (DIST – distention of rapprochement) и характеризуется универсальным множеством [0;130] кбт;

- вторая входная ЛП β_2 «Время сближения» (TIME – rendezvous time) характеризуется универсальным множеством [0;30] мин.;

- выходная переменная β_3 «Вероятность опасности» (DANGER – probability of danger) характеризует вероятностной степенью опасности во множестве [0;1].

Согласно представленных и описанных 4 этапов первая входная лингвистическая переменная β_1 будет включать в себя четыре термина, характеризующих базовое терм-множество: Assessment of the situation (AS) – оценка обстановки; Divergence of the situation (DS) – манёвр расхождения; Threat of rapprochement (TR) – угроза сближения; Collision threat (CT) – угроза столкновения.

Каждый из описанных термов базового терм-множества является нечеткой переменной, представляющей упорядоченную последовательность (α, U, A). Параметр α определяет название нечеткой переменной; U является универсальным множеством, задающим область определения нечеткой переменной; A – задаёт нечеткое множество, из области определения множества U , определяющее значения нечеткой переменной, и характеризующейся функцией принадлежности.

Функция принадлежности $\mu_A(x)$ ставит в соответствие каждому из элементов $x \in U$ некоторое действительное число на интервале [0, 1]. Для разработки математической модели нечеткой системы первоначальной оценки опасности сближения судов сформированы функции принадлежности для каждого из термов базового терм-множества по каждой ЛП, определенной в нечеткой системе.

Функции принадлежности для термов первой входной ЛП β_1 имеют линейный Z-образный и линейный S-образный вид и строятся по параметрам следующим образом:

- для функции CT: $a = 0, b = 0, c = 5, d = 30$;
- для функции TR: $a = 25, b = 40, c = 55$;
- для функции DS: $a = 50, b = 65, c = 80$;
- для функции AS: $a = 75, b = 120, c = 130, d = 130$.

Опишем термы первой входной лингвистической β_1 с помощью функции принадлежности, задаваемой формулами (1-4):

$$\mu_{CT}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 5, \\ \frac{30-x}{25}, & 5 \leq x \leq 30, \\ 0, & x \geq 30. \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_{TR}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 25, \\ \frac{x-25}{15}, & 25 \leq x \leq 40, \\ \frac{55-x}{15}, & 40 \leq x \leq 55, \\ 0, & x \geq 55. \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{DS}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 50, \\ \frac{x-50}{15}, & 50 \leq x \leq 65, \\ \frac{80-x}{15}, & 65 \leq x \leq 80, \\ 0, & x \geq 80. \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{AS}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 75, \\ \frac{x-75}{45}, & 75 \leq x \leq 120, \\ 1, & x \geq 120. \end{cases} \quad (4)$$

Вторая входная ЛП β_2 «Время сближения» определяется временем с момента обнаружения цели и до полного расхождения между судами. С учетом пяти возможных временных факторов данная переменная будет включать в себя пять термов, характеризующих базовое терм-множество: Very little (VL) – очень мало; Little (L) – мало; Enough (EN) – достаточно; Lot (LOT) – много; Lots of (LS) – очень много.

Функции принадлежности для термов второй входной ЛП β_2 имеют линейный Z-образный и линейный S-образный вид (представленный на рис.4) и строятся по параметрам следующим образом:

- для функции VL: $a = 0, b = 0, c = 4, d = 6$;
- для функции L: $a = 5, b = 9.5, c = 14$;
- для функции EN: $a = 13, b = 16.5, c = 20$;
- для функции LOT: $a = 17, b = 21, c = 25$;
- для функции LS: $a = 24, b = 27, c = 30, d = 30$.

Термы второй входной переменной β_2 имеют следующий аналитический вид функции принадлежности (формулы 5-9):

$$\mu_{VL}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 4, \\ \frac{6-x}{2}, & 4 \leq x \leq 6, \\ 0, & x \geq 6. \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_L(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 5, \\ \frac{2x-10}{9}, & 5 \leq x \leq 9.5, \\ \frac{28-2x}{9}, & 9.5 \leq x \leq 14, \\ 0, & x \geq 14. \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{EN}(x) = \begin{cases} \frac{2x-26}{7}, & 13 \leq x \leq 16.5, \\ \frac{40-2x}{7}, & 16.5 \leq x \leq 20, \\ 0, & x \geq 20. \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{LOT}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 17, \\ \frac{x-17}{4}, & 17 \leq x \leq 21, \\ \frac{25-x}{4}, & 21 \leq x \leq 25, \\ 0, & x \geq 25. \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{LS}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 24, \\ \frac{x-24}{3}, & 24 \leq x \leq 27, \\ 1, & x \geq 27. \end{cases} \quad (9)$$

Выходная ЛП β_3 «Вероятность опасности» определяется универсальным множеством в

диапазоне от 0 до 1, причем, чем ближе значение к 1, тем выше опасность ситуации сближения судов. Нами данное множество разбито на пять возможных промежутков и определяет пять термов, характеризующих базовое терм-множество: Very low (VL) – очень низкая вероятность опасности; Low (L) – низкая вероятность опасности; Medium (M) – средняя вероятность опасности; High (H) – высокая вероятность опасности; Very high (VH) – очень высокая вероятность опасности. Функции принадлежности для термов выходной ЛП β_3 имеют линейный Z-образный и линейный S-образный вид и строятся по параметрам следующим образом:

- для функции VL: $a = 0, b = 0, c = 0.1, d = 0.25$;
- для функции L: $a = 0.2, b = 0.3, c = 0.4$;
- для функции M: $a = 0.35, b = 0.5, c = 0.65$;
- для функции H: $a = 0.6, b = 0.7, c = 0.8$;
- для функции VH: $a = 0.75, b = 0.9, c = 1.0, d = 1.0$.

Если у набора входных и выходных данных системы выделить термы, то с помощью математического аппарата на основе теории нечетких множеств можно получить описание системы, в котором формализуются только отношения между термами. Решить задачу в этом случае можно в соответствии с неколичественными приемами, используемыми опытными специалистами, если описать эти приемы с помощью логических операций [14-16].

В методе парных соотношений «судно-судно» пусть имеет n экспертов и необходимо найти степени принадлежности к объектам. Каждый i -тый эксперт должен определить (исходя из хорошей морской практики) парные соотношения:

$$m_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } \mu_i > \mu_j \\ 0, & \text{если } \mu_i \leq \mu_j \end{cases}, l, j = 1, 2, \dots, k. \quad (10)$$

Экспертная оценка для i -того эксперта находится по формуле: $p_{il} = \frac{\sum_{j=1}^k m_{ij}}{\sum_{l=1}^k \sum_{j=1}^k m_{ij}}$. (11)

Тогда окончательно, вероятность для параметра l будет иметь вид:

$$p_l = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{il}, l = 1, 2, \dots, k \quad (12)$$

Для решения поставленной задачи была построена база правил, соответствующих системе нечеткого вывода, и, содержащих 20 правил нечеткой продукции вида:

1. If (DIST is CT) and (TIME is VL) then (DANGER is VH)
2. If (DIST is CT) and (TIME is L) then (DANGER is VH)

.....
20. If (DIST is AS) and (TIME is LS) then (DANGER is VL)

По полученным данным навигационной информации оценивается риск столкновения, производится классификация судов по степени опасности (рисунок 3). Чтобы система могла предупреждать о появлении представляющих угрозу судов, предусмотрена возможность ввода границ d^s , t^s безопасных значений дистанции и времени кратчайшего сближения.

	CT	TR	DS	AS
VL	VH	H	H	M
L	VH	H	M	L
EN	H	M	L	L
LOT	M	L	L	VL
LS	L	VL	VL	VL

Рис. 3. Вероятностная оценка опасности сближения судов

Визуальная цветовая комбинация появляющихся судов-целей позволяет в любой момент времени визуально классифицировать «цели» по степени опасности; определить главную «цель» и вид сближения с ней; выявить «цели», которые в ближайшем времени после выполнения маневра могут представлять опасность. Это позволит улучшить знание ситуации, обеспечить быструю ее оценку, уменьшить время на принятие решения по расхождению.

На основе построенных правил и применения программы MATLAB в среде Fuzzy Logic представим модель нечеткой продукции (рисунок 4), позволяющие определять вероятностную характеристику в различных ситуациях сближения судов на основе двух входных лингвистических переменных β_1 «Дистанция сближения» и β_2 «время сближения».

Модель задачи оценки опасности сближения судов в терминах нейросетевой модели

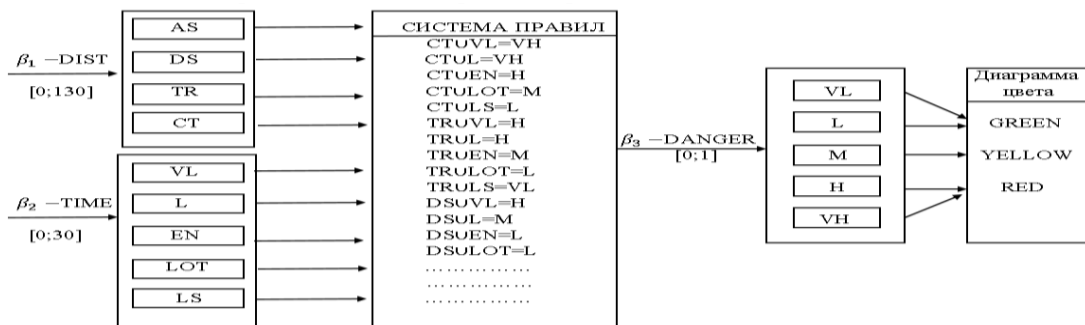


Рис. 4. Конфигурация сети, определяющая вероятность оценки опасности сближения судов

При оценке опасности столкновения анализируются также и другие цифровые данные (пеленг, дистанция, курс, скорость), предоставляемые СПС по любой сопровождаемой

«цели», данные которых легко вводятся в виде лингвистических переменных в описанную модель [17—19].

Экспериментальная оценка нечеткой продукционной модели

В результате работы данной программы на основе базы правил нечеткой продукции математической модели, включающей первоначальных 20 позиций, построена трехмерная поверхность нечеткого логического вывода, позволяющая продемонстрировать функционирование логико-лингвистической модели (рисунок 5).

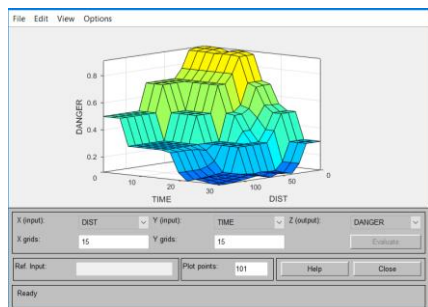


Рис. 5. Трехмерная поверхность нечеткого вывода модели по входным ЛП β_1 и β_2 и выходной ЛП β_3

Построенная модификационная трехмерная модель нечеткой системы первоначальной оценки опасности сближения судов, позволяет дать вероятностную характеристику столкновения пары сближающихся судов.

В состав графического интерфейса программного средства Fuzzy Logic Toolbox входят не только программы нечеткой системы вывода Fuzzy Inference System Editor со вспомогательными программами, но и редактор гибридных систем (ANFIS Editor, ANFIS-редактор) и программа нахождения центров кластеров (Clustering – кластеризация).

При использовании нечетких нейронных сетей (fuzzy-neural networks) вывод строится на основе аппарата нечеткой логики. В этом случае параметры функций принадлежности настраиваются по алгоритмам обучения нейронных сетей, а модуль нечеткого управления представляется в форме многослойной сети. Наибольшее распространение имеют нечеткие нейронные сети вида ANFIS и TSK. Такие сети являются универсальными аппроксиматорами.

На основании данных рассмотренной выше задачи, по алгоритму Сугено была получена следующая гибридная система вида (рисунок 6):

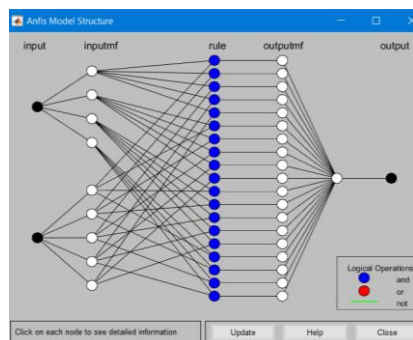


Рис. 6. Структура сгенерированной системы нечеткого вывода

На основе разработанной нечеткой продукционной модели в случае, если траектория движения судна с учетом навигационных ограничений является допустимой, оценивается риск опасного сближения попарно со всеми контролируруемыми судами-целями. Для этого моделируется с помощью программ оценка опасности сближения с каждым из судов-целей, а также их импликация с учетом минимизации по вводимым ЛП из нескольких выходных ЛП вида: очень низкая степень опасности (very low danger); низкая опасность (low danger); средняя опасность (medium danger); высокая степень опасности (high danger); очень высокая степень опасности (very high danger).

Заключение

Для комплексной обработки данных, поступающих с разных типов датчиков обнаружения судов, система управления использует алгоритмы оценки и идентификации уровня сближения объектов с целью последующего выбора оптимального варианта движения.

В построенной математической модели используются данные приборов и основные правила судоходства, математические алгоритмы управления и алгоритмы на основе нейронных сетей управления.

Построенная модификация модели позволяет сделать вывод о возможности разработки автоматической системы определения степени риска сближения судов в различных ситуациях и в дальнейшем возможности выбора оптимального маневра расхождения судов.

В разработанной математической модели нами использовались только две входные переменные, учитывающие две основные характеристики (дистанцию и время), однако данная модель планируется в разработке нечеткой системы на основе увеличения числа лингвистических переменных, учитывающих позицию цели относительно нашего судна, ЭДЦ, положение ЛОД, параметры расхождения судов, а также внести в модель внешние факторы воздействия на судно.

Таким образом, дальнейшие исследования, связанные с вероятностной оценкой безопасного сближения судов на основе нейросетевой модели можно рассматривать по следующим направлениям:

- построение модели на основе комплекса характеристик;
- разработка единой вероятностной оценки безопасного сближения встречных судов на основе модели «судно-судно» для каждой пары судов.

Многими авторами осуществляются попытки разработки универсальной системы, учитывающей все правила и обобщающей опыт судоводителей по морской практике, однако сложность и недостаток многих моделей заключается и интерпретации выходного параметра, и его корректировке.

Продукционная математическая модель, построенная на теории нечетких множеств, позволяет устранить такой недостаток и с определенной точностью достоверной информации оценить опасность сближения и определить характеристики оптимального расхождения судов.

Литература

1. Седова Н.А., Седов В.А., Баженов Р.И., Денисов И.В., Бекназарова С.С. Нейро-нечеткий подход для анализа опасности столкновения для морского судна. Морские интеллектуальные технологии. № 2-1 (56), 2022, 245-251 с.
2. Студеникин Д.Е., Джавукцян М.Л. Использование нечетких чисел для оценки точности определении места судна. Эксплуатация водного транспорта. № 2 (79), 2016, 41-45 с.
3. Студеникин Д.Е., Использование нейронных сетей для организации визуального наблюдения. Морские интеллектуальные технологии. Т.3 № 4, 2019, 91-95 с.
4. Астреин В.В. Классификация нечетких ситуаций принятия решений в задачах предупреждения столкновения судов. В мире научных открытий. № 6-1 (42), 2013, 39-51 с.
5. Гриняк В.М., Девятисильный А.С. Нечеткая система предупреждения об опасности сближения морских судов. Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. № 2, 2016, 93 с.
6. Глушков С.В. Методы повышения качества управления судном на основе использования нейросетевых технологий. Дис.док.техн.наук. Владивосток. 2008.
7. Дерябин В.В. Обзор исследований, посвященных использованию нейросетевых технологий в судовождении. Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. № 11, 2015, 52-60 с.
8. Круглов В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. М.: Физматлит, 2001, 224 с.
9. Письменный М. Н. Краткий курс лекций по изучению международных правил предупреждения столкновений судов в море [Электронный ресурс]. <http://pilotservice.narod.ru/masters/ColRegLec/ColRegLec.htm>. Доступ 10.12.2014.
10. Международные правила предупреждений столкновений судов в море, 1972 г. Под ред. Н. А. Долотова, Н. А. Паламарчука. М., 1982, 87 с.
11. Мальцев А.С. Маневрирование судов при расхождении. Одесса, Морской тренажерный центр, 2002, 208 с.
12. Вагущенко Л.Л., Вагущенко А.Л. Поддержка решений по расхождению с судами. Одесса: Фенікс, 2010, 229 с.
13. Глушков С. В. Автоматическое управление курсом судна с использованием регулятора на нечеткой логике. Мехатроника, автоматизация, управление. №. 12, 2007, 32-36 с.
14. Панькина С. И., Цепордей О. В., Кравченко А. И., Сомко М. Л. И Лютикова М. Н. Модель оценки воздействия на экосистемы прибрежной зоны. В серии конференций IOP: Наука о Земле и окружающей среде. Том 872, № 1, 2021, 012016 с.
15. Астреин В. В., Кондратьев С. И. и Боран-Кешишян А. Л. Выбор оптимальных моделей прогнозирования в системе поддержки принятия решений по безопасности навигации. В журнале физики: Серия конференций. Том 2061, № 1, 2021, 012104 с.
16. Hwang, C. N. The intergrated design of fuzzy collision – avoidance and H[∞] – autopilots on vessels. *The Journal of Navigation*, Vol. 55, 2002, 117-136 s.
17. Lee S., Kwon K., Joh J. A Fuzzy Logic for Autonomous Navigation of Marine Vehicles Satisfying COLREGS Guidelines. *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 2, No. 2, 2004, 171-181 s.
18. Perera L. P., Carvalho J. P., Guedes Soares, C. Intelligent Ocean Navigation and Fuzzy – Bayesian Decision/ Action Formulation. *Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 37, No. 2, 2012, 204-218 s.

References

1. Sedova N.A., Sedov V.A., Bazhenov R.I., Denisov I.V., Beknazarova S.S. Neuro-Fuzzy Approach to Collision Hazard Analysis for a Marine Vessel. *Marine intelligent technologies*. No. 2-1 (56), 2022, 45-251 s.
2. Studenikin D.E., Dzhavuktsyan M.L. The use of fuzzy numbers to assess the accuracy of determining the position of the vessel. *Operation of water transport*. No. 2 (79), 2016, 41-45 s.
3. Studenikin D.E., The use of neural networks for organizing visual observation. *Marine intelligent technologies*. V.3 No. 4, 2019, 91-95 s.
4. Astrein V.V. Classification of fuzzy decision-making situations in ship collision avoidance problems. In the world of scientific discoveries. No. 6-1 (42), 2013, 39-51 s.
5. Grinyak V.M., Devyatisilny A.S. Fuzzy warning system about the danger of approaching sea vessels. *News of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems*. No. 2, 2016, 93 s.
6. Glushkov S.V. Methods for improving the quality of ship control based on the use of neural network technologies. *Dis.dok.techn.sci. Vladivostok*. 2008.
7. Deryabin V.V. Review of studies on the use of neural network technologies in navigation. *Transport: science, technology, management. Scientific information collection*. No. 11, 2015, 52-60 s.
8. Kruglov V. V. Fuzzy logic and artificial neural networks / V. V. Kruglov, M. I. Dli, R. Yu Golunov. Moscow: Fizmatlit, 2001, 224 s.
9. Pismenny M. N. A short course of lectures on the study of international rules for preventing collisions of ships at sea [Electronic resource]. <http://pilotservice.narod.ru/masters/ColRegLec/ColRegLec.htm>. Accessed 12.10.2014.
10. International Rules for the Prevention of Collisions at Sea, 1972, ed. N. A. Dolotova, N. A. Palamarchuk. M., 1982, 87 s.
11. Maltsev A.S. Maneuvering of vessels at a divergence. Odessa, Marine Training Center, 2002, 208 s.
12. Vagushchenko L.L., Vagushchenko A.L. Support for decisions on disagreement with the courts. Odessa: Phoenix, 2010, 229 s.

13. Glushkov S. V. Automatic control of the ship's course using a fuzzy logic controller. *Mechatronics, automation, control*. No. 12, 2007, 32-36 s.
14. Pankina S. I., Tsepordey O. V., Kravchenko A. I., Somko M. L. and Lyutikova M. N. A model for assessing the impact on ecosystems of the coastal zone. In the IOP conference series: Earth and Environmental Science. Volume 872, No. 1, 2021, 012016 s.
15. Astrein V. V., Kondratiev S. I., and Boran-Keshishyan A. L. Choice of optimal forecasting models in a decision support system for navigation safety. In *Physics Journal: Conference Series*. Vol. 2061, No. 1, 2021, 012104 s.
16. Hwang C. N. The intergrated design of fuzzy collision – avoidance and H^∞ – autopilots on vessels. *The Journal of Navigation*, Vol. 55, 2002, 117-136 s.
17. Lee, S., Kwon, K., Joh, J. A Fuzzy Logic for Autonomous Navigation of Marine Vehicles Satisfying COLREGS Guidelines. *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 2, No. 2, 2004, 171-181 s.
18. Perera L. P., Carvalho, J. P., Guedes Soares, C. Intelligent Ocean Navigation and Fuzzy – Bayesian Decision/ Action Formulation. *Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 37, No. 2, 2012, 204-218 s.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Марина Николаевна Лютикова, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93., e-mail: mnlyutikova@mail.ru

Marina N. Lyutikova, Ph.D.(Eng), Candidate of Technical Science, Department of Radioelectronics and Information Technologies, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: mnlyutikova@mail.ru

Светлана Ивановка Панькина, кандидат педагогических наук, доцент кафедры высшая математика и физика, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспектЛенина,93.,e-mail: sipankina@mail.ru

Svetlana I. Pankina, Ph.D. (Edu) Candidate of Sciences in Pedagogy, Department of Mathematics and Physics, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: e-mail: sipankina@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 30.01.2023.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 28.02.2023.
Принята к публикации/accepted for publication 03.03.2023.



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173
190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3
e-mail: mit-journal@mail.ru http://morintex.ru

**ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ
НАУЧНОГО ЖУРНАЛА
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов:

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи в WORD и PDF, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта и инструкция размещены на сайте www.morintex.ru
3. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
4. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
5. Рубрикатор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) должны быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу mit-journal@mail.ru (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта <http://morintex.ru> из раздела «для авторов».

На страницах журнала публикуются НОВЫЕ научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом должен быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации 14400 рублей по выставяемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

**Главный редактор научного журнала
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ

Гайкович А.И. Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

Караев Р.Н., Разуваев В.Н., Фрумен А.И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П.А. Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**

Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Теория систем автоматического управления техническими средствами кораблей. Курс лекций – СПб.: НИЦ «Моринтех», 2022. 300 стр.

В курсе лекций рассматриваются основные вопросы теории систем автоматического управления линейных, нелинейных, импульсных, цифровых, адаптивных и оптимальных, основанный на дифференциальных уравнениях и передаточных функциях, способствующих физическому пониманию процессов, происходящих в системах автоматического управления, для дальнейшего усвоения особенностей применения матричных уравнений для исследования устойчивости и качества современных цифровых систем автоматического управления.

Есть в продаже: **цена 1800 руб. + пересылка**